



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE – FLORIANÓPOLIS-SC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Emeli Lalesca Aparecida da Guarda

Análise das condições internas de edificações residenciais em projeções climáticas futuras: avaliando a vulnerabilidade dos ocupantes e a eficácia de estratégias passivas de projeto

Florianópolis

2023

Emeli Lalesca Aparecida da Guarda

Análise das condições internas de edificações residenciais em projeções climáticas futuras: avaliando a vulnerabilidade dos ocupantes e a eficácia de estratégias passivas de projeto

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Doutora em Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Martin Ordenes Mizgier
Coorientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Florianópolis

2023

Guarda, Emeli Lalesca Aparecida da
ANÁLISE DAS CONDIÇÕES INTERNAS DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS EM
PROJEÇÕES CLIMÁTICAS FUTURAS : AVALIANDO A VULNERABILIDADE DOS
OCUPANTES E A EFICÁCIA DE ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE PROJETO /
Emeli Lalesca Aparecida da Guarda ; orientador, Martin Ordenes
Mizgier, coorientador, Alberto Hernandez Neto, 2023.
213 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Mudanças Climáticas. 3.
Temperatura Efetiva Padrão (SET). 4. Habitação de Interesse
Social. 5. Adaptação Climáticas. I. Mizgier, Martin Ordenes. II.
Neto, Alberto Hernandez. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.
IV. Título.

Emeli Lalesca Aparecida da Guarda

Análise das condições internas de edificações residenciais em projeções climáticas futuras: avaliando a vulnerabilidade dos ocupantes e a eficácia de estratégias passivas de projeto

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 13/11/2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Waldo Bustamante Gomez
Pontificia Universidad Católica de Chile

Profª Drª Joyce Correna Carlo
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Roberto Lamberts
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.



Documento assinado digitalmente
Maira Longhinotti Felipe
Data: 17/11/2023 13:58:00-0300
CPF: ***.406.999-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
Martin Gabriel Ordenes Mizgier
Data: 17/11/2023 08:58:47-0300
CPF: ***.042.009-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Martin Ordenes Mizgier
Orientador

*A Deus, que me proporcionou esta tão desejada oportunidade,
aos meus queridos pais e irmão, ao meu esposo, aos meus
amigos e a todos que contribuíram ao longo da minha jornada,
pelo amor, apoio e confiança. Muito obrigada!*

AGRADECIMENTOS

Escrever estas palavras me enche de gratidão, pois é o momento de expressar meu reconhecimento às pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste trabalho, mesmo em meio ao caos da pandemia que vivenciamos.

Primeiramente, agradeço a Deus, pois reconheço que tudo o que sou e conquistei provém Dele e é dedicado a Ele. Ele me ouviu nos momentos de dificuldade, confortou-me nas horas mais desafiadoras e deu-me forças para tornar este sonho realidade.

A minha família, aos meus pais e ao meu irmão, quero expressar minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pela constante presença, pelas orações, pela compreensão e pelo lugar especial que ocupam em minha vida.

Ao meu esposo, Kelvin, meu companheiro de vida, quero agradecer pelo amor constante, apoio incansável, incentivo contínuo e por acreditar na importância da minha pesquisa.

Ao meu orientador, Martin Ordenes Mizgier, por ter acreditado em mim, pelo acolhimento, pela confiança, pelos ensinamentos não somente voltados à pesquisa, mas também à vida. Agradeço pelo tempo dedicado, orientações valiosas, incentivo constante, nível de exigência que me fez crescer no meio acadêmico. Também sou grata pelo convite para integrar o Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon), do qual me orgulho de fazer parte e que gerou frutos significativos.

Ao meu coorientador, Alberto Hernandez Neto, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que aceitou me coorientar no estágio final desta pesquisa, agradeço não apenas como coorientador, mas por ter sido um verdadeiro mestre com seus ensinamentos em todas as conversas. Agradeço pelo tempo dedicado, pelas orientações valiosas e pela ajuda nas simulações computacionais. Trabalhar e aprender ao seu lado tem sido uma experiência enriquecedora.

Aos professores que, gentilmente, aceitaram o convite para avaliar esta pesquisa, o Prof. Dr. Waldo Enrique Bustamante Gomez (Pontificia Universidad Católica de Chile), a Prof. Dra. Joyce Correna Carlo (Universidade Federal de Viçosa) e o Prof. Dr. Roberto Lamberts (Universidade Federal de Santa Catarina), agradeço pela disposição em contribuir com suas avaliações extremamente relevantes.

Agradeço a todos os meus professores, cujo ensinamento e apoio foram fundamentais nesta jornada. Em especial, à Prof. Luciane Cleonice Durante e ao Prof. Ivan Júlio Apolônio Callejas, da Universidade Federal do Mato Grosso, minha gratidão pelas inúmeras conversas,

apoio, incentivo à pesquisa, orientações valiosas e contribuições essenciais. Esta pesquisa é fruto do meu mestrado, o início da minha caminhada, que compartilhei com vocês. Meu mais profundo agradecimento.

Agradeço, especialmente, ao Prof. Roberto Lamberts pela oportunidade de trabalhar e participar como bolsista do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Minha passagem pelo laboratório foi enriquecedora, repleta de aprendizado, pesquisa e amizades valiosas. Muito obrigada.

Aos professores da UFSC com quem tive a oportunidade de cursar disciplinas durante o doutorado, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, agradeço.

Agradeço a todos os amigos que Deus colocou em meu caminho ao longo desta jornada.

Aos meus colegas de doutorado, agradeço pela união e força para concluir disciplinas e trabalhos.

Aos meus amigos do LabCon e, além dele, agradeço por tantos encontros, conversas, cafés e aprendizado. Em especial, a minha grande amiga e parceira de pesquisa Renata Mansuelo, agradeço pelo acolhimento em Florianópolis, pelas contribuições inestimáveis nesta pesquisa, pela paciência nas inúmeras dúvidas, pelo apoio incansável e pelo incentivo à pesquisa.

Agradeço aos meus amigos, tanto os que conheci pessoalmente quanto os que encontrei online devido às circunstâncias impostas pela pandemia. Em especial:

À Mônica pela amizade e apoio no início da jornada no LabCon;

À Alexandra pela amizade e apoio nas disciplinas e no início da jornada do doutorado;

À Verônica pela amizade e apoio nesta pesquisa com a programação em Python;

À Karen pela amizade e apoio nesta pesquisa com o dimensionamento dos brises;

À Raquel pela amizade e apoio com as inúmeras conversas sobre arquivos climáticos;

Ao Rayner e Marcelo pela amizade e apoio com o entendimento das ferramentas de elaboração de arquivos climáticos;

À Andrea Triana pela amizade e inúmeros cafés que resultaram em discussões valiosas sobre a temática desta pesquisa;

Ao Danilo pela amizade e colaborações feitas a esta pesquisa;

Às professoras Regina Rodrigues e a Denise Duarte pelas valiosas colaborações durante a banca de qualificação, que desempenharam um papel fundamental na conclusão desta pesquisa;

À Daniela e Lidiane, que participaram deste trabalho como alunas de PIBIC;
Aos colegas e professores da Universidade de Brasília pelo apoio nesta pesquisa;
Meu sincero agradecimento a todos!

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PosARQ), à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que financiou grande parte desta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento!

Quanto ao futuro, não se trata de prevê-lo, mas de torná-lo possível
“Pour ce qui est de l’avenir, il ne s’agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible”
(Antoine de Saint Exupéry em Citadelle, 1948)

RESUMO

Diante do aumento progressivo da temperatura terrestre, as mudanças climáticas são reconhecidas como um desafio-chave global para o século XXI. Estudar as consequências deste fenômeno tem ganhado importância mundial, inclusive no âmbito das edificações, questionando-se sobre as condições internas nos cenários futuros. Este trabalho tem por objetivo geral investigar as condições térmicas internas de um edifício multifamiliar, considerando o cenário de emissão SSP5-8.5, a fim de identificar situações de vulnerabilidade dos ocupantes e analisar a capacidade das estratégias passivas de projeto como medidas de adaptação. Os procedimentos metodológicos consistem de: preparação dos arquivos climáticos para cenários futuros de 2050 e 2080; definição de uma habitação para o objeto de estudo e enquadramento no nível mínimo de desempenho térmico; elaboração de propostas de intervenção na envoltória, definindo quinze tipologias (HISenv1 a HISenv15); implementação de estratégias passivas de projeto, a saber: sombreamento e massa térmica para resfriamento; simulação computacional das tipologias para fins de avaliação da severidade e intensidade do evento de calor e das horas em vulnerabilidade dos ocupantes, utilizando como indicador a temperatura efetiva padrão (SET) e os seus limites de sensação térmica ao calor e, estimativa do consumo energético para resfriamento e das emissões de dióxido de carbono. Sob os impactos das mudanças climáticas, a temperatura média anual aumenta em +4,8°C nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis, e a umidade relativa do ar apresenta reduções de -11% em Manaus, -7% em Cuiabá e -8,5% em Florianópolis até 2080. Aprimorar a envoltória da habitação, com foco na redução da transmitância térmica, resulta em uma diminuição da severidade e intensidade durante a exposição diurna em 2080, nas três cidades analisadas. Tais reduções são mais acentuadas durante a exposição noturna, período que engloba uma ocupação mais prolongada, principalmente em climas de temperaturas mais amenas. Em Manaus, mesmo com as intervenções na envoltória, as condições internas permanecem com temperaturas superiores 32,0°C. A adoção de estratégias passivas de projeto de forma isolada não demonstra uma eficácia significativa na redução da severidade e intensidade, e nas horas de vulnerabilidade, no entanto, a combinação das estratégias, como sombreamento e telhado verde, são positivos até 2050. Em 2080, a eficácia dessas estratégias é reduzida, não ultrapassando 10% de redução em Manaus, 20% em Cuiabá e 37% em Florianópolis durante as exposições diurnas e noturnas. Nesse contexto, torna-se crucial o emprego do ar-condicionado para manter as condições internas da habitação em níveis adequados. No entanto, em Manaus e Cuiabá, ocorre um aumento significativo desse consumo em 2080, correspondendo a mais de 80% do consumo energético total da habitação. No caso de Florianópolis, esse consumo energético aumenta para mais de 79% do consumo energético total. Assim, as emissões de dióxido de carbono também aumentam, ultrapassando 0,5 tCO₂/ano em Manaus, 0,8 tCO₂/ano em Cuiabá e 0,45 tCO₂/ano em Florianópolis no período de 2080. Conclui-se que, considerando a vida útil das edificações de 50 anos, se faz necessário repensar as especificações construtivas vigentes, incorporando intervenções para absorver os impactos das mudanças climáticas, apontando diretrizes de como deve-se construir hoje, para proporcionar ambientes com condições internas favoráveis nos cenários climáticos futuros.

Palavras-chave: habitação de interesse social, temperatura efetiva padrão (SET); mudanças climáticas; adaptação climática; consumo energético.

ABSTRACT

In the face of the progressive increase in global temperatures, climate change is recognized as a critical global challenge for the 21st century. The study of the consequences of this phenomenon has gained worldwide importance, including within the field of building design, where questions arise regarding future indoor conditions. This work aims to investigate the indoor thermal conditions of a multifamily building, considering the SSP5-8.5 emission scenario. The main objective is to identify potential occupant vulnerability situations and assess the effectiveness of passive design strategies as adaptation measures. The methodological procedures consist of preparing climate files for future scenarios in 2050 and 2080; selecting a representative dwelling and ensuring compliance with minimum thermal performance standards; proposing interventions in the building envelope, defining fifteen typologies (HISenv1 to HISenv15); implementing passive design strategies, including shading and thermal mass for cooling; computationally simulating these typologies to assess the severity and intensity of heat events, as well as hours of occupant vulnerability. The standard effective temperature (SET) is used as an indicator, along with its limits of thermal sensation to heat. Additionally, energy consumption estimation for cooling and carbon dioxide emissions is conducted. Under the influence of climate change impacts, the average annual temperature rises by +4.8°C in Manaus, Cuiabá, and Florianópolis. Simultaneously, air relative humidity decreases by -11% in Manaus, -7% in Cuiabá, and -8.5% in Florianópolis until 2080. Enhancing the building envelope, mainly by reducing thermal transmittance, reduces the severity and intensity of heat events during daytime exposure in 2080 across the three cities under investigation. These reductions are more pronounced during nighttime exposure, which involves extended occupancy, particularly in areas with milder temperatures. In Manaus, even with envelope improvements, indoor conditions remain above 32.0°C. Adopting passive design strategies alone does not significantly reduce severity, intensity, or hours of vulnerability. However, combining strategies, such as shading and green roofs, will prove effective until 2050. In 2080, the effectiveness of these strategies diminishes, not exceeding a 10% reduction in Manaus, 20% in Cuiabá, and 37% in Florianópolis during both daytime and nighttime exposures. In this context, air conditioning becomes crucial to maintaining suitable indoor conditions. However, in Manaus and Cuiabá, there is a significant increase in energy consumption in 2080, representing more than 80% of the total energy consumption of the building. In the case of Florianópolis, this energy consumption rises to over 79% of the total energy consumption. Consequently, carbon dioxide emissions also increase, surpassing 0.5 tCO₂/year in Manaus, 0.8 tCO₂/year in Cuiabá, and 0.45 tCO₂/year in Florianópolis by 2080. In conclusion, considering the 50-year lifespan of buildings, it is essential to reconsider existing construction specifications incorporating interventions to mitigate the impacts of climate change. This work provides guidelines on how construction should proceed today to create environments with favorable indoor conditions in future climate scenarios.

Keywords: social housing, standard effective temperature (SET), climate change, climate adaptation, energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação dos conceitos de riscos, exposição, vulnerabilidade, adaptação e mitigação ao ambiente construído da pesquisa	35
Figura 2 - Diagrama conceitual do desenvolvimento da proposta de pesquisa.....	35
Figura 3 - Diagrama conceitual dos capítulos do referencial teórico com base nos conceitos da pesquisa	41
Figura 4 - Alterações climáticas: A) evolução temporal do Forçamento Radiativo Efetivo (FRE) e B) alterações na temperatura da superfície global (média anual).....	42
Figura 5 – Resumo dos cenários de emissões dos relatórios do IPCC	44
Figura 6 – Fluxograma do processo metodológico dos estudos pilotos para o aprimoramento da metodologia da pesquisa.....	91
Figura 7 – Planta baixa da Habitação de Interesse Social Multifamiliar (HIS) - objeto de estudo	94
Figura 8 - Estudo de fachada por orientação do objeto de estudo.....	96
Figura 9 - Vistas da edificação residencial multifamiliar modeladas por meio do <i>Plugin Open Studio</i>	97
Figura 10 - Padrões de Ocupação e sistema de iluminação artificial	98
Figura 11 – Fluxograma do processo metodológico para enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico.....	100
Figura 12 – Pavimento, orientação solar e apartamento de estudo	104
Figura 13 – Fluxo de calor total das superfícies da HISbase em Manaus	107
Figura 14 – Fluxo de calor total das superfícies da HISbase em Cuiabá	108
Figura 15 – Fluxo de calor total das superfícies da HISbase em Florianópolis	109
Figura 16 – Ganho de calor pelas superfícies da HISbase	109
Figura 17 - Esquema metodológico das simulações das tipologias construtivas para fins de elaboração de diretrizes construtivas.....	113
Figura 18 – Detalhamento dos brises dos dormitórios e sala da HISenv para cada região de estudo.....	118
Figura 19 – Temperatura média de bulbo seco (°C) no período histórico e futuros (2050 e 2080)	129
Figura 20 – Umidade Relativa do Ar (%) no período histórico e futuros (2050 e 2080).....	131
Figura 21 – Radiação Global Horizontal (Wh/m ²) no período histórico e futuros (2050 e 2080)	133

Figura 22 – Severidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus	137
Figura 23 – Intensidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus	138
Figura 24 – Severidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá	138
Figura 25 – Intensidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá	139
Figura 26 – Severidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis	140
Figura 27 – Intensidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis	141
Figura 28 – Severidade diurna e noturna das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus	144
Figura 29 – Intensidade nas tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus	145
Figura 30 – Severidade diurna e noturna das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá	146
Figura 31 – Intensidade nas tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá.....	147
Figura 32 – Severidade diurna e noturna das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis	148
Figura 33 – Intensidade nas tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis.....	149
Figura 34 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus	152
Figura 35 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá.....	153
Figura 36 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis.	154
Figura 37 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus	156

Figura 38 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá.....	157
Figura 39 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis.....	158
Figura 40 – Consolidação da severidade total com os limites de resposta fisiológica dos ocupantes no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus.....	160
Figura 41 – Consolidação da severidade total com os limites de resposta fisiológica dos ocupantes no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá.....	162
Figura 42 – Consolidação da severidade total com os limites de resposta fisiológica dos ocupantes no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis.....	163
Figura 43 – Capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus.....	167
Figura 44 – Capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá.....	169
Figura 45 – Capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis.....	170
Figura 46 – Consumo energético para resfriamento das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus.....	174
Figura 47 – Consumo energético para resfriamento das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá.....	176
Figura 48 – Consumo energético para resfriamento das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis.....	177
Figura 49 – Emissões totais de dióxido de carbono por consumo energético das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus.....	180
Figura 50 – Emissões totais de dióxido de carbono por consumo energético das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá.....	181
Figura 51 – Emissões totais de dióxido de carbono por consumo energético das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080).....	181
Figura 52 - Mapa Climático com a identificação das regiões de estudo.....	203
Figura 53 - Variação das temperaturas médias anuais nas três cidades de estudo considerando os arquivos climáticos das Normais Climatológicas, TMYx e SWERA.....	204

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das pesquisas sobre ambiente construído e mudanças climáticas no contexto brasileiro	32
Tabela 2 – Definição de riscos, exposição, vulnerabilidade, adaptação e mitigação conforme o IPCC	34
Tabela 3 - Visão geral dos cenários SSPs e as semelhanças com os RCPs.....	44
Tabela 4 - Processos metodológicos de downscaling.....	47
Tabela 5 – Principais características das ferramentas de elaboração de arquivos climáticos futuros.....	50
Tabela 6 – Esferas da vulnerabilidade dos ocupantes no interior das edificações	54
Tabela 7 - Resumo das métricas de superaquecimento interno em edificações residenciais ...	58
Tabela 8 – Demonstração das equações de superaquecimento interno de edificações residenciais	59
Tabela 9 – Demonstração das equações dos modelos de conforto adaptativo	60
Tabela 10 – Resumo dos valores limites de SET definidos pelos estudos acima	65
Tabela 11 – Escala quantitativa de sensação térmica do índice SET	66
Tabela 12 - Estratégias bioclimáticas, seus limites de aplicação e possíveis estratégias	69
Tabela 13 – Resumo das pesquisas que investigaram as estratégias bioclimáticas de caráter passivo	72
Tabela 14 – Resumo das pesquisas que investigam as medidas passivas de projeto em edificações	75
Tabela 15 – Pesquisas da demanda energética em edificações sob a influência das mudanças climáticas considerando classificação de Köppen-Geiger.....	78
Tabela 16 – Pesquisas da demanda energética em edificações sob a influência das mudanças climáticas considerando classificação de ASHRAE 169	78
Tabela 17 – Categorias de mitigação definidas pelo IPCC	83
Tabela 18 - Resumo das pesquisas que investigam as melhorias da eficiência do sistema de ar condicionado e do seu uso	87
Tabela 19 - Características das cidades analisadas.....	92
Tabela 20 - Dimensões originais das aberturas da HISbase e atendimento aos critérios da NBR15.575.....	94
Tabela 21 - Propriedades termofísicas dos materiais construtivos originais da HISbase	95
Tabela 22 - Taxa metabólica, fração radiante dos ocupantes conforme a NBR 15.575.....	98

Tabela 23 - Densidade de potência da iluminação e frações radiante e visível conforme a NBR 15.575	98
Tabela 24 - Dimensões originais das aberturas da HISbase e atendimento aos critérios da NBR15.575	104
Tabela 25 – Dimensões ajustadas das aberturas da HISbase conforme critérios da NBR15.575	105
Tabela 26 – Adaptação das SVVE da HISbase para atendimento ao nível mínimo de desempenho	105
Tabela 27 – Propriedades térmicas dos sistemas de vedação vertical e horizontal das intervenções	116
Tabela 28 – Abreviatura da parametrização das tipologias com as intervenções na envoltória	117
Tabela 29 – Parâmetros do telhado verde inseridos na simulação computacional.....	120
Tabela 30 - Limites de resposta fisiológica e sensação térmica ao calor dos ocupantes em diferentes faixas de SET	124
Tabela 31 - Temperatura de bulbo seco máxima e mínima mensal (°C) no período histórico e futuros (2050 e 2080)	130
Tabela 32 – Umidade relativa máxima e mínima mensal (%) no período histórico e futuros (2050 e 2080).....	132
Tabela 33 – Média anual de Temperatura de Bulbo Seco (em °C), Umidade Relativa do Ar (em %) e Radiação Global Horizontal (em Wh/m ²) no período histórico e projeções climáticas.	134
Tabela 34 – Resumo da diferença de severidade e intensidade diurna e noturna entre as tipologias HISbase e HISenv6 nos períodos históricos e futuros (2050 e 2080)	142
Tabela 35 – Resumo da diferença da severidade e intensidade diurna e noturna entre as tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros	150
Tabela 36 – Resumo da diferença da capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado entre os cenários nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080)	172
Tabela 37 – Propriedades térmicas das paredes, cobertura e piso para o modelo de referência	208

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	Ambientes de Permanência Prolongada
AR4	Quarto Relatório de Avaliação do IPCC
AR5	Quinto Relatório de Avaliação do IPCC
AR6	Sexto Relatório de Avaliação do IPCC
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CCWorldWeatherGen	Climate Change World Weather file Generator
CDF	Função de Distribuição Cumulativa
CFCs	Clorofluorcarbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
COP	Coefficiente de Desempenho
Ct	Capacidade térmica
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
DPI	Densidade de Potência Instalada de Iluminação
ECO ₂	Emissão total de dióxido de carbono
FR	Forçamento Radiativo
FRE	Forçamento Radiativo Eficaz
GCM	Modelo de Circulação Geral
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ O	Vapor de água
He	Horas de Excedência
HFCs	Hidrofluorcarbonos
HIS	Habitação de Interesse Social
IAF	Índice de área foliar
IC	Índice de calor
IEA	Agência Internacional de Energia
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IOD	Grau de Superaquecimento Interno
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISD	Integrated Surface Database
N ₂ O	Óxido nitroso
NC	Normais Climatológicas
NCDC	National Climatic Data Center

NES	Nordeste da América do Sul
NO	Monóxido de nitrogênio
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSA	Norte da América do Sul
nZEB	Energia quase Zero
O ₃	Ozônio
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PFCs	Perfluorcarbonos
PHFT _{UH}	Percentual de Horas de Ocupação da Habitação dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa
PMCMV	Programa Minha Cada Minha Vida
PMV	Voto Médio Estimado
Pt,APP	Percentual de Elementos Transparentes
Pv,APP	Percentual de Abertura para Ventilação
PVC	Policloreto de vinil
RCM	Regional Climate Model
RCP	Caminhos de Concentração Representativa
SES	Sudeste da América do Sul
SET	Temperatura Efetiva Padrão
SEV _D	Severidade do evento de calor durante a exposição diurna
SEV _N	Severidade do evento de calor durante a exposição noturna
SEV _t	Severidade total do evento de calor
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIs	Sistemas Isolados
SO ₂	Dióxido de enxofre
SRES	Relatórios Especiais sobre Cenários de Emissões
SSPs	Shared Socioeconomic Pathways
ST	Sensação Térmica
SVVE	Vedações Verticais Externas
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TA	Temperatura do ar
TAR	Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TMY	Typical Meteorological Year
Tomáx _{UH}	Temperatura Operativa Anual Máxima
Tomín _{UH}	Temperatura Operativa Anual Mínima
Top	Temperatura Limite Superior

TRM	Temperatura radiante média
TRY	Test Reference Year
U	Transmitância térmica
UDH	Graus-Hora não atendidas
UH	Unidades Habitacionais
UNEP	United Nations Environment Program
UR	Umidade Relativa do Ar
v	Velocidade do vento
We	Excesso Ponderado Diário
ZB	Zonas Bioclimáticas

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDAS

%	Porcentagem
<	Menor que
±	Mais ou menos
≥	Maior ou igual
°C	Grau Celsius
°Ch/dia	Graus hora por dia
c	Calor específico
Clo	Vestimentas
g	Gramas
J/kg.K	Joules por quilograma por kelvin
kg	Quilograma
kJ/m ² .K	Quilojoules por metro quadrado por kelvin
kWh	Quilowatt-hora
kWh/m ²	Quilowatt-hora por metro quadrado
m/s	Metros por segundo
Met	Taxa Metabólica
ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
tCO ₂ /ano	Toneladas de dióxido de carbono por ano
tCO ₂ /MWh	Toneladas de dióxido de carbono por megawatt-hora
W/m ²	Watt por metro quadrado
W/m ² K	Watt por metro quadrado kelvin
α	Absortância
γ	Condutividade térmica
ρ	Densidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 INEDITISMO DA PESQUISA	30
1.2 OBJETIVOS.....	36
1.2.1 Objetivo Geral	36
1.2.2 Objetivos Específicos.....	36
1.3 HIPÓTESES.....	37
1.4 ALCANCE DA PESQUISA	37
1.5 ESTRUTURA DA TESE	38
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	40
2.1 O CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E OS CENÁRIOS DE EMISSÕES DO IPCC	41
2.2 ELABORAÇÃO DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS PARA SIMULAÇÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO CONSIDERANDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	45
2.3 OS RISCOS DOS EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS PARA AS EDIFICAÇÕES E SEUS OCUPANTES.....	51
2.3.1 Vulnerabilidade dos ocupantes ao superaquecimento interno das edificações e os riscos à saúde humana	53
2.3.2 Métricas para a avaliação do superaquecimento interno em edificações	56
2.3.3 Índices para avaliação das condições internas das edificações considerando as respostas fisiológicas dos ocupantes.....	62
2.4 ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS: UM OLHAR PARA A APLICAÇÃO DE MEDIDAS PASSIVAS EM PERÍODOS DE SUPERAQUECIMENTO	67
2.5 CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES FRENTE AOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: BREVE PANORAMA DA DEMANDA PARA RESFRIAMENTO	76
2.5.1 Estratégias aplicadas aos sistemas de condicionamento de ar para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas	80

3 ESTUDOS PILOTOS PARA O APRIMORAMENTO DA METODOLOGIA DA PESQUISA.....	90
3.1 METODOLOGIA – ESTUDOS PILOTOS	92
3.1.1 Caracterização climática das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis	92
3.1.2 Caracterização da Habitação de Interesse Social Multifamiliar – Objeto de estudo... 	93
3.1.3 Simulações computacionais: modelagem, definição dos padrões de ocupação, das cargas internas dos ambientes e da temperatura do solo.....	97
3.1.4 Enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico conforme a NBR 15.575	99
3.1.5 Análise dos ganhos de calor nos fechamentos opacos e transparentes da HISbase: estudo de comportamento térmico	100
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES - ESTUDOS PILOTOS	102
3.2.1 Definição da orientação solar, do pavimento e apartamento de estudo	102
3.2.2 Adequação da HISbase ao nível mínimo de desempenho térmico estabelecido pela NBR 15.575	104
3.2.3 Ganhos de calor nos fechamentos opacos e transparentes da HISbase.....	106
3.3 CONCLUSÕES - ESTUDOS PILOTOS	110
4 METODOLOGIA.....	111
4.1 ELABORAÇÃO DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS FUTUROS	113
4.2 DEFINIÇÃO DAS ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE PROJETO PARA ADAPTAÇÃO DA HABITAÇÃO FRENTE AOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS.....	114
4.2.1 Intervenções na envoltória da tipologia HISbase	115
4.2.2 Implementação de dispositivos de sombreamento na tipologia HISenv.....	117
4.2.3 Implementação do telhado verde na tipologia HISenv+bri.....	120
4.3 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES INTERNAS POR MEIO DA TEMPERATURA EFETIVA PADRÃO (SET).....	121

4.4 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO DO AR-CONDICIONADO E CONSUMO ENERGÉTICO NO PERÍODO HISTÓRICO E FUTUROS.....	124
4.4.1 Prognóstico das emissões de dióxido de carbono por meio do consumo energético das tipologias no período histórico e futuros (2050 e 2080).....	126
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	128
5.1 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS PERFIS CLIMÁTICOS DAS REGIÕES DE ESTUDO	128
5.2 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES INTERNAS DAS TIPOLOGIAS CONSTRUTIVAS.	135
5.2.1 Severidade e Intensidade do evento de calor no interior dos ambientes das tipologias construtivas no período histórico e futuros (2050 e 2080)	135
<i>5.2.1.1 Análise do impacto das intervenções na envoltória das tipologias na severidade e intensidade do evento de calor</i>	<i>136</i>
<i>5.2.1.2 Análise do impacto da implementação de estratégias passivas de projeto nas tipologias na severidade e intensidade do evento de calor</i>	<i>142</i>
5.2.2 Horas em vulnerabilidade dos ocupantes das habitações no período histórico e futuros (2050 e 2080).....	151
<i>5.2.2.1 Análise do impacto das intervenções na envoltória das tipologias nas horas em vulnerabilidade dos ocupantes</i>	<i>151</i>
<i>5.2.2.2 Análise do impacto da implementação de estratégias passivas de projeto nas tipologias nas horas em vulnerabilidade dos ocupantes</i>	<i>154</i>
5.2.3 Conclusões das análises das condições internas no período histórico e futuros (2050 e 2080): Um olhar para os ambientes internos e propostas de diretrizes construtivas em habitações residenciais	159
5.3 ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO E IMPACTO AMBIENTAL NO PERÍODO HISTÓRICO E FUTUROS (2050 E 2080)	164
5.3.1 Capacidade de resfriamento e aquecimento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080).....	165

5.3.2 Estimativa do consumo de energia elétrica do período histórico e futuros (2050 e 2080).....	172
<i>5.3.2.1 Estimativa das emissões de dióxido de carbono decorrentes do consumo energético do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080).....</i>	<i>179</i>
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	183
REFERÊNCIAS	188
APÊNDICE A – Estudos pilotos para o aprimoramento da metodologia da pesquisa	202
APÊNDICE B – Severidade total do evento de calor das quinze tipologias construtivas (HISenv1 a HISenv15) das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis no período histórico e futuros (2050 e 2080)	209
APÊNDICE C – Intensidade total do evento de calor das quinze tipologias construtivas (HISenv1 a HISenv15) das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis no período histórico e futuros (2050 e 2080)	210
APÊNDICE D – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes durante a exposição diurna e noturna no interior dos ambientes de permanência prolonga das quinze tipologias construtivas (HISenv1 a HISenv15) das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis no período histórico e futuros (2050 e 2080)	211

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas induzidas pelo homem têm causado alterações sem precedentes no sistema terrestre (IPCC, 2021). Sem tomar medidas para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), o aquecimento global provavelmente ultrapassará 2,0°C acima dos níveis pré-industriais, até 2050 (Neto et al., 2022; Wang et al., 2022). Mundialmente, 2020 foi o segundo ano mais quente em 141 anos, com uma temperatura global da superfície terrestre e oceânica de +0,98°C. Além disso, os sete anos mais quentes ocorreram desde 2014 e, na América do Sul, a temperatura anual aumentou cerca de +0,14°C por década desde 1910 (NOAA, 2021).

Neste contexto, eventos climáticos extremos têm se tornado mais frequentes e severos, comprometendo a saúde humana. As ondas de calor são consideradas um dos perigos mais severos do Mundo. Na Rússia, em 2010, uma onda de calor foi responsável por 56.000 mortes (Barriopedro et al., 2011), e em doze países europeus, no verão de 2003, totalizaram cerca de 71.000 mortes. Em 2010, esse número foi de 50.000 mortes (Martín e Paneque, 2022; Hondula et al., 2015). Em junho de 2021, uma onda de calor afetou a América do Norte, quebrando recordes locais de temperatura em mais de 4,6°C, estabelecendo um novo recorde nacional de temperatura de 49,6°C (WMO, 2021).

Diante disso, para ampliar o conhecimento sobre mudanças climáticas e alertar para os riscos, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publica Relatórios Especiais sobre Cenários de Emissões (SRES). Esses relatórios analisam possíveis alterações climáticas, impactos ao meio ambiente e sociedade, além de formas de mitigação com perspectivas até o final do século. O IPCC divulgou, em 2022, o Sexto Relatório de Avaliação (AR6), que associa as mudanças climáticas a influências antropogênicas e identifica os principais cenários de emissões como *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs). Esses cenários resultam da combinação de caminhos de desenvolvimento socioeconômico com medidas de mitigação das mudanças climáticas. Os SSPs são divididos em cinco cenários ilustrativos: sustentabilidade (SSP1-1.9), meio-termo (SSP1-2.6), rivalidade regional (SSP2-4.5), desigualdade (SSP3-7.0) e uso intensivo de combustível fóssil (SSP5-8.5). Para 2100, as projeções indicam um aquecimento provável de 1,0°C a 1,8°C para SSP1-1.9 e de 3,3°C a 5,7°C para SSP5-8.5 (IPCC, 2022).

Esse relatório ressalta que as últimas três décadas foram sucessivamente mais quentes, alertando para um aumento potencial de mais de 5,0°C na temperatura média do ar até o final do século. Isso resultaria no aquecimento dos oceanos e em eventos extremos e atípicos mais

frequentes. O aumento das emissões de GEE, atividade econômica, estilo de vida, uso de energia e avanços em políticas, principalmente climáticas, impulsiona essas mudanças (IPCC, 2022).

Um dos contribuintes para esses impactos é o setor da construção civil, em que as edificações são responsáveis pelo consumo total de 40% da energia mundial e contribuem com até 30% das emissões anuais de GEE (Skillington et al., 2022; Unep, 2020; Ciancio et al., 2020). Um dos principais impulsionadores desse consumo de energia nos edifícios foi o aumento da demanda por resfriamento, para manter as condições de conforto térmico durante as ondas de calor ou as altas temperaturas internas (WMO, 2020). Neste contexto, relatórios do IPCC, da Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas e Protocolos como o de Kyoto vêm aumentando a conscientização do público sobre o superaquecimento de edifícios e cidades, o uso de energia e as suas implicações ambientais, diante dos impactos das mudanças climáticas (UNEP, 2020; IPCC, 2014; Gupta e Gregg, 2012).

Novas condições climáticas impõem novos impactos aos edifícios e cidades, tanto pelo aumento da temperatura média global quanto pelas alterações nas demais variáveis climatológicas. Considerando a vida útil das edificações residenciais entre 50 e 75 anos (ABNT, 2021), destaca-se que o desempenho dos edifícios atuais está sendo afetado pelas mudanças climáticas previstas para as próximas décadas. Além disso, a grande maioria das construções existentes foi concebida sem considerar as condições climáticas locais, e raramente avaliada em termos de simulações computacionais para avaliação das condições internas. Aqueles que incorporaram fatores climáticos no projeto da edificação frequentemente utilizaram dados climáticos históricos nas simulações, muitas vezes, sem abranger extremos de temperatura ou cenários de mudanças climáticas.

Diante disso, as edificações devem assegurar a qualidade de vida dos ocupantes, principalmente, em relação às temperaturas elevadas. No entanto, casos de mortes relacionadas ao calor ocorrem frequentemente, em função da incapacidade dos edifícios em manter temperaturas internas aceitáveis (Zou et al., 2022). Assim, a pressão e os desafios impostos sobre os edifícios aumentam, visto que podem representar riscos substanciais para a saúde e bem-estar dos ocupantes, resultando em estresse térmico ou até mesmo morte.

As pesquisas atuais se concentram na demanda e previsão do uso de energia no ambiente construído, com ênfase no aumento significativo na demanda energética para resfriamento durante o verão e períodos de ondas de calor (Barea et al., 2022; Vurro et al., 2022; Zou et al., 2022; Ciancio

et al., 2020). Esse padrão é observado também em climas tropicais, como no caso do Brasil (Neto et al., 2022; Guarda et al., 2020; Triana, Lamberts e Sassi, 2018; Invidiata e Ghisi, 2016), embora com variações regionais.

No entanto, poucos estudos se concentram nas consequências das mudanças climáticas nas condições internas das edificações (Barea et al., 2022; Campagna e Fiorito, 2022; Escandón et al., 2022). Essa lacuna é notável em relação às edificações residenciais, que são os tipos mais suscetíveis aos riscos de superaquecimento interno (Zou et al., 2022). Há evidências indicando que edifícios que dependem de ventilação natural enfrentam riscos elevados de superaquecimento em cenários de mudanças climáticas, enquanto edifícios condicionados artificialmente estão sujeitos à preocupação quanto à interrupção do fornecimento elétrico, resultando em aumento das temperaturas internas (Hosseini, Javanroodi e Nik, 2022; Ozarisoy, 2022).

Além disso, a exposição dos ocupantes a temperaturas internas superiores a 30°C e umidade relativa do ar acima de 50% pode impactar a saúde humana, afetando a frequência cardíaca (Abusharha, Pearce e Fagehi, 2016). Efeitos negativos à saúde foram observados por Liu, Zhong e Wargocki (2017) com temperaturas internas acima de 35°C e a umidade relativa do ar de 40%. De acordo com Fan, Liu e Wargocki (2019), ocupantes expostos a temperaturas internas superiores a 37°C e 70% de umidade relativa podem resultar em dificuldades de concentração, fadiga e aumento da pressão arterial. Em vista desse cenário, o superaquecimento de edifícios pode aumentar a vulnerabilidade dos ocupantes ao estresse térmico, especialmente em edificações com baixo desempenho térmico e ausência de sistemas de resfriamento ativo. Isso conduz a exposições a temperaturas internas elevadas e reforça a necessidade de considerar medidas adaptativas visando a redução de tais impactos na saúde humana.

Neste contexto, o IPCC (2022) define a vulnerabilidade como a “propensão ou predisposição a ser adversamente afetado”. De maneira similar, a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2022) define-a como “as características e circunstâncias de uma comunidade ou sistema que o tornam suscetível aos efeitos prejudiciais de um perigo”. Em consonância com essas definições, edificações com altas temperaturas internas podem deixar seus ocupantes mais propensos à vulnerabilidade ao calor. Isso abrange uma série de fatores, incluindo sensibilidade a danos, a falta de capacidade para lidar com os perigos e, principalmente, adaptar-se ao risco e à exposição (IPCC, 2022).

Andrić, Koc e Al-Ghamdi (2019) destacam que o ambiente construído está sujeito às mudanças climáticas e pode ser estruturado em quatro categorias principais: impactos estruturais (catástrofes ambientais), construção civil (deterioração dos sistemas), materiais (redução do desempenho) e condições internas e energia (temperaturas e umidade internas). Sun, Specian e Hong (2020) ressaltam que a vulnerabilidade está diretamente relacionada com famílias de baixa renda, que não têm acesso à infraestrutura básica como energia e poder de compra, resultando em baixa capacidade de enfrentar as mudanças climáticas.

Dessa forma, é evidente que mudanças climáticas afetam as temperaturas internas das edificações, aumentando o risco de superaquecimento e exposição dos ocupantes ao estresse térmico, tornando as condições internas hostis. Conseqüentemente, esse cenário implica em um aumento do consumo de energia para ar-condicionado.

Entretanto, uma grande parcela da população mundial e brasileira se encontra no cenário de pobreza energética, o que significa que essas famílias não têm acesso aos serviços energéticos ou recursos financeiros para sustentar o consumo energético necessário (Simões e Leder, 2022). Além disso, a indústria da construção civil, visando atender à demanda habitacional, muitas vezes prioriza redução de custos e aumento de velocidade construtiva, resultando em habitações padronizadas que não consideram as características climáticas locais (Alves, Gonçalves e Duarte, 2021; Triana, Lamberts e Sassi, 2018; Marra, 2017). Como resultado, essas habitações apresentam baixo desempenho térmico, especialmente em climas tropicais, resultando em altas temperaturas internas para os ocupantes.

Assim, as mudanças climáticas desafiam os edifícios a enfrentarem esses impactos e reduzir a vulnerabilidade dos ocupantes, sem aumentar excessivamente a dependência de sistemas de condicionamento de ar. Além disso, os efeitos da pandemia de Covid-19, na vida cotidiana levou os moradores a passarem a maior parte do tempo em suas residências e em ambientes fechados, expondo-os a um risco de superaquecimento, principalmente nas habitações de baixa renda. Portanto, a adaptação dos edifícios se torna ainda mais urgente e crucial considerando um cenário futuro em que a pandemia pode-se tornar uma situação cada vez mais frequente.

Sob essa perspectiva, o IPCC (2022) define a adaptação como “um processo de ajuste ao clima presente ou futuro e seus impactos, com o intuito de minimizar danos ou aproveitar oportunidades benéficas”. Em outras palavras, a adaptação envolve a implementação de estratégias e medidas para proteger a população dos impactos das mudanças climáticas. O IPCC (2022)

destaca que adaptação abrange um conjunto de estratégias e medidas disponíveis e apropriadas para reduzir a vulnerabilidade climática, abordando aspectos estruturais, ecológicos e comportamentais.

Desse modo, a adaptação das edificações emerge como um instrumento crucial para reduzir a vulnerabilidade dos ocupantes às altas temperaturas internas. Nesse sentido, um aspecto fundamental da adaptação dos edifícios é que seja de caráter passivo e bioclimático, estabelecendo uma relação entre o clima e a arquitetura, e priorizando estratégias que não dependam do uso de energia elétrica para sua operação. Wang et al. (2021) destacam a necessidade crescente de compreender os desafios impostos pelas mudanças climáticas, a fim de limitar o desconforto térmico dos ocupantes por meio da aplicação de estratégias projetuais bioclimáticas.

Entretanto, diante do clima cada vez mais quente, observa-se que as estratégias passivas, como a ventilação natural, sombreamento, aumento de inércia térmica e isolamentos, muitas vezes podem não ser suficientes para manter as condições internas dos edifícios dentro de limites aceitáveis (Barea et al., 2022; Pajek e Kosir, 2021; Roshan, Oji e Attia, 2019). Nesse contexto, sistemas de ar-condicionado emergem como soluções rápidas para proteger os ocupantes das altas temperaturas internas e garantir o conforto térmico (Bienvenido-Huertas, Sánchez-García e Rubio-Bellido, 2022; Zaki et al., 2021).

Segundo a IEA (2019), o número de aparelhos de ar-condicionado em edifícios residenciais aumentará de 1,6 para 5,6 bilhões em todo o mundo até 2050. Apesar de serem eficazes na redução desses riscos, o sistema de ar-condicionado ainda não está disponível ou é inacessível em muitas áreas. Além disso, mesmo onde esses sistemas existem, falhas mecânicas ou interrupções energéticas podem ocorrer, tornando-os inoperantes (IEA, 2022). Ademais, a crescente emissão de gases de efeito estufa proveniente do consumo energético dos sistemas de resfriamento representa uma preocupação adicional (Kwok, Schoetter e NG, 2022), contribuindo ainda mais para as mudanças climáticas.

Dessa forma, a dependência excessiva dos sistemas de ar-condicionado pode gerar um ciclo vicioso no qual os ocupantes se acostumam a ambientes com temperaturas mais baixas, reduzindo sua tolerância a temperaturas mais altas (Buranvi, 2019). Esse padrão representa um desafio significativo no século XXI, uma vez que inibe a adaptação dos ocupantes a temperaturas mais altas, prejudicando a percepção de conforto térmico (Kwok, Schoetter e NG, 2022) e desencorajando a adoção de estratégias passivas de resfriamento. Ademais, o calor rejeitado pelos

sistemas de ar-condicionado pode contribuir para o aumento das temperaturas nas ruas, intensificando o efeito de ilhas de calor urbanas e impactando as condições internas das edificações (Kwok, Schoetter e NG, 2022).

De fato, a aplicação de estratégias adaptativas passivas, como ventilação natural diurna e noturna, e resfriamento passivo, demonstra ser eficaz na redução do consumo energético e, conseqüentemente, na redução das demandas do sistema de ar-condicionado (Bienvenido-Huertas, Sánchez-García e Rubio-Bellido, 2022). Além disso, tais estratégias revelam que ocupantes desse tipo de edificação são mais tolerantes a variações de temperatura quando comparados com aqueles que dependem exclusivamente de ar-condicionado (Bienvenido-Huertas et al., 2020; Kim et al., 2019). Logo, a correlação entre as estratégias passivas de projeto e o uso efetivo de sistemas de resfriamento artificial pode não apenas reduzir o consumo de energia, mas também evitar o ciclo de dependência.

Portanto, compreender a intensidade das altas temperaturas no interior das edificações, assim como seus impactos na vulnerabilidade dos ocupantes e potencial impacto na saúde se torna de extrema importância no contexto das mudanças climáticas. Além disso, a investigação da capacidade adaptativa das estratégias passivas de projeto para melhorar as condições internas, reduzir o consumo energético e minimizar o uso de sistemas de ar-condicionado pode fornecer diretrizes valiosas para decisões de projeto que visam a sustentabilidade futura, garantindo que as condições internas das edificações residenciais se mantenham em níveis aceitáveis.

1.1 INEDITISMO DA PESQUISA

O aumento das ocorrências de altas temperaturas e do superaquecimento interno das edificações pode expor os ocupantes ao risco de vulnerabilidade ao calor decorrente das alterações climáticas. Com o intuito de amenizar os impactos das altas temperaturas no interior das edificações, a adoção dos sistemas de resfriamento ativos, como o ar-condicionado, tem sido utilizada como uma medida de adaptação climática para a melhoria das condições internas de maneira rápida. No Brasil, estima-se que o consumo energético em função dos sistemas de ar-condicionado, principalmente no setor residencial, tenha aumentado em cerca de 237% no período de 2005 a 2017 (EPE, 2018). Além disso, o aumento excessivo no consumo de sistemas de ar-condicionado tem desencadeado inúmeros impactos, como falhas no fornecimento energético do

país, aumento nas emissões de CO₂ e a dependência excessiva do sistema, o que leva a um ciclo vicioso entre os usuários.

No entanto, as investigações sobre mudanças climáticas e o ambiente construído têm se concentrando na previsão da demanda energética futura e na implementação do ar-condicionado como medida de adaptação às altas temperaturas (Barea et al., 2022; Vurro et al., 2022; Zou et al., 2021; Ciancio et al., 2020). Por outro lado, as pesquisas direcionadas às condições internas dos edifícios e aos riscos associados à vulnerabilidade dos ocupantes têm sido discutidas recentemente e despertado forte interesse da comunidade científica internacional (Laouadi et al., 2023; Baba et al., 2022; Ozarisoy, 2022; Pajek e Kosir, 2021).

No contexto brasileiro, até o momento, diversas pesquisas têm abordado as condições térmicas internas dos edifícios residenciais e buscado soluções para lidar com os desafios das mudanças climáticas. Alves (2014) investigou as condições térmicas internas dos edifícios residenciais em São Paulo, com foco na população idosa em situação de vulnerabilidade climática. Triana (2016) analisou o desempenho térmico de habitações em São Paulo e Salvador, utilizando do modelo adaptativo de conforto e adotando medidas de eficiência energética para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Guarda (2019) analisou o desempenho termoenergético de habitações de interesse social unifamiliares em Cuiabá, utilizando estratégias passivas de projeto como forma de tornar as edificações resilientes às projeções climáticas futuras. Alves (2019) quantificou o desempenho térmico e as condições de conforto térmico em edifícios residenciais multifamiliares em São Paulo, considerando o contexto urbano e os elementos projetuais, como brises, varandas e sombreamentos do entorno. A Tabela 1 resume essas pesquisas.

Tabela 1 - Resumo das pesquisas sobre ambiente construído e mudanças climáticas no contexto brasileiro

Autor	Relatório e cenário	Avaliação	Edificação	Cidade	Estratégias adotadas
Alves (2014)	AR5 RCP8.5	Desempenho térmico e condições de conforto	Edifício residencial unifamiliar e multifamiliar, isolado	São Paulo	-
Triana (2016)	AR4 A2	Eficiência energética e ciclo de vida	Edifício residencial unifamiliar, modelo HIS, isolado	São Paulo e Salvador	Paredes externas e cobertura, venezianas nas janelas, ventilação natural e elevação da habitação (risco de inundação)
Guarda (2019)	AR4 A2	Desempenho termoenergético	Edifício residencial unifamiliar, modelo HIS, isolado	Cuiabá	Paredes externas e cobertura
Alves (2019)	AR5 RCP8.5	Desempenho térmico e condições de conforto	Edifício residencial multifamiliar, contexto urbano	São Paulo	Janelas (taxa de abertura), varandas, brises, orientação solar, espessura das paredes externas, taxa de área envidraçada e sombreamento o entorno

Fonte: a autora (2023)

As pesquisas mencionadas utilizam o modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020) como método de avaliação do conforto térmico. Esse modelo considera a temperatura operativa interna em relação à temperatura externa predominante, com o objetivo de satisfazer 80% dos usuários. Esse método é aplicável a ambientes sem sistemas de ventilação mecânica, com uma faixa de temperatura externa média entre 10°C e 33,5°C. Os limites de conforto e desconforto térmico por calor ou frio são determinados pela temperatura neutra $\pm 2,5^\circ\text{C}$ para 80% e $\pm 3,5^\circ\text{C}$ para 90% dos usuários satisfeitos.

No entanto, surgem dúvidas quanto à avaliação de conforto térmico dos ocupantes no interior das edificações, uma vez que esses métodos consideram apenas a temperatura operativa interna e sua relação com a temperatura externa. Além disso, a faixa de aplicação desses métodos pode não responder aos impactos das mudanças climáticas, como as ondas de calor, eventos climáticos extremos e as altas temperaturas. Levando em consideração uma região de clima quente, nos dias atuais, quando se incluem os impactos das mudanças climáticas, as temperaturas podem aumentar em torno de $+5,7^\circ\text{C}$ até o final do século no cenário SSP5-8.5 (IPCC, 2022). Isso significa que as temperaturas externas podem ultrapassar os 33,5°C, assim como as internas, o que torna o método de avaliação atualmente utilizado inaplicável.

Ademais, é conhecido que a exposição prolongada a altas temperaturas e umidade relativa do ar pode ter impactos negativos para a saúde humana, podendo até levar à morte em situações extremas. Taylor et al. (2023) relatam que, embora os modelos de conforto adaptativo utilizem a temperatura operativa como métrica principal, outros fatores ambientais têm maior importância

fisiológica na avaliação dos ocupantes em relação aos ambientes. Esses fatores incluem a umidade relativa do ar, a velocidade do ar e a temperatura radiante. Portanto, é essencial considerar esses parâmetros na avaliação do conforto térmico dos ocupantes, a fim de proporcionar ambientes internos em níveis adequados. Nesse contexto, surge o questionamento se avaliar a percepção do ocupante apenas com base nas temperaturas interna e externa é suficiente para identificar os riscos do calor para a saúde humana?

Sendo assim, para avaliar os riscos das mudanças climáticas no interior das edificações e, principalmente, quantificar a vulnerabilidade dos ocupantes, é necessário que a métrica de análise não se limite apenas à temperatura do ar, mas inclua outras variáveis ambientais relevantes, bem como variáveis humanas. Nesse sentido, a presente tese apresenta um potencial de inovação ao analisar a vulnerabilidade dos ocupantes no interior das edificações, levando em consideração o pior cenário de emissões do IPCC (2022), com o objetivo de verificar as condições de estresse térmico, principalmente, em edificações residenciais.

Outra questão em discussão é se é possível garantir melhores condições internas apenas por meio do uso de estratégias passivas e, assim, obter adaptação climática do edifício em situações de clima extremo, principalmente, levando em consideração os tipos climáticos quentes do Brasil e os impactos das mudanças climáticas. Diante desse cenário, a tese propõe analisar até que ponto a capacidade adaptativa das estratégias passivas de projeto será capaz de reduzir a vulnerabilidade dos ocupantes em dias quentes e, conseqüentemente, manter o interior das edificações em níveis aceitáveis.

Além disso, é importante destacar que o uso dos sistemas mecânicos de resfriamento já é uma realidade em edifícios residenciais, e com o aumento das temperaturas e ocorrência de eventos climáticos extremos, sua utilização tende a se intensificar ainda mais. Portanto, surge o desafio de reduzir as horas de uso desses sistemas, visando não apenas a economia de energia, mas também a redução das emissões de GEE e a mitigação das mudanças climáticas.

Dessa maneira, esta pesquisa aborda os conceitos de riscos, exposição, vulnerabilidade, adaptação e mitigação, conforme descritos no AR6 do IPCC (2022), e os adapta para serem aplicados, principalmente, ao contexto do ambiente construído, considerando seus ocupantes e as condições internas. Esses conceitos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Definição de riscos, exposição, vulnerabilidade, adaptação e mitigação conforme o IPCC

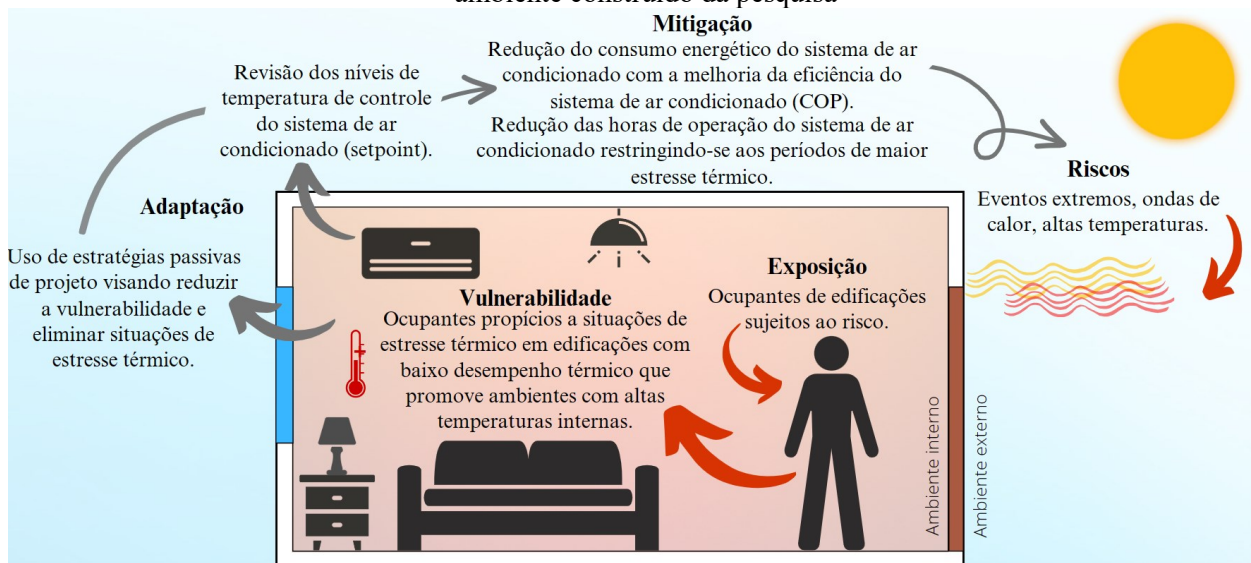
Conceito	Definição do IPCC (2022)
Riscos	Possibilidade de ocorrência de eventos ou condições que possam afetar negativamente sistemas humanos, naturais ou físicos.
Exposição	Pessoas, meios de subsistências, ecossistemas, recursos ambientais, infraestrutura, bens socioeconômicos, que possam ser afetados adversamente ou negativamente.
Vulnerabilidade	Suscetibilidade de um sistema ou grupo de pessoas aos efeitos adversos das mudanças climáticas, incluindo a capacidade de adaptação.
Adaptação	Um processo de ajuste ao clima atual ou futuro e seus impactos, a fim de moderar danos ou explorar oportunidade benéficas.
Mitigação	Ações tomadas para reduzir as emissões de GEE e minimizar as causas das mudanças climáticas.

Fonte: adaptado de IPCC (2022)

Com base nos conceitos apresentados se realizou a aplicação no ambiente construído. Nesse sentido, os riscos foram considerados como eventos extremos, ondas de calor e altas temperaturas, os quais exercem impacto sobre a exposição dos ocupantes das edificações, os quais estarão sujeitos a tais riscos. A vulnerabilidade se concentra em ocupantes suscetíveis a situações de estresse térmico em edificações, sobretudo, aquelas de baixo desempenho térmico, uma vez que podem induzir a ambientes com elevadas temperaturas internas, tornando-os quentes e hostis.

Diante desse cenário, a adaptação, por meio da implementação de estratégias passivas de projeto, tem como propósito primordial a redução da vulnerabilidade dos ocupantes e a eliminação das situações de estresse térmico, visando estabelecer um ambiente satisfatório no âmbito do conforto térmico. Além disso, com os impactos das mudanças climáticas, a utilização de sistemas de ar-condicionado é uma realidade. No entanto, a revisão dos níveis de temperatura de controle do sistema é necessária, pois podem reduzir o consumo energético do sistema e diminuir as horas de operação do sistema, restringindo apenas aos períodos de maior estresse térmico. Consequentemente, isso contribui para a mitigação das mudanças climáticas e redução dos riscos. A representação desta abordagem está delineada na Figura 1.

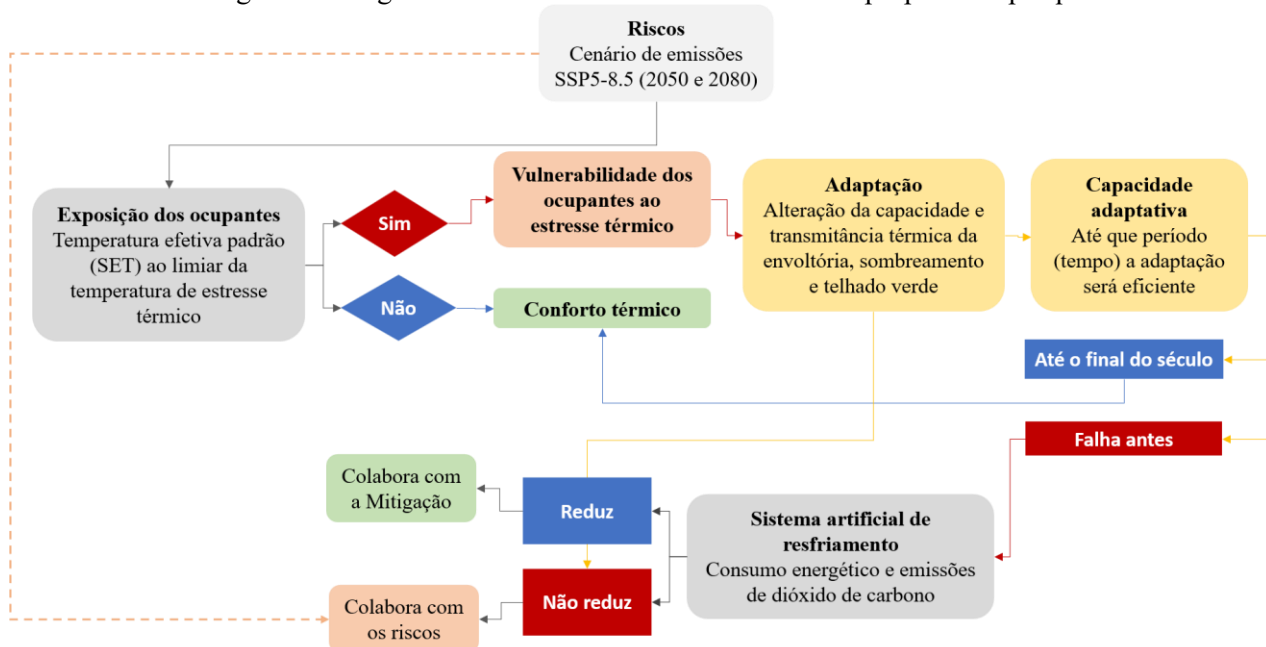
Figura 1 - Aplicação dos conceitos de riscos, exposição, vulnerabilidade, adaptação e mitigação ao ambiente construído da pesquisa



Fonte: a autora (2023)

Apoiando-se nos conceitos previamente apresentados e com a finalidade de consolidar os principais aspectos e pontos a serem explorados no decorrer do desenvolvimento da tese, a Figura 2 apresenta o diagrama conceitual da pesquisa. Esta representação gráfica ilustra as relações entre os diferentes elementos a serem abordados, proporcionando uma visão geral das interações e do escopo do estudo.

Figura 2 - Diagrama conceitual do desenvolvimento da proposta de pesquisa



Fonte: a autora (2023)

Neste contexto, os objetivos da tese se direcionam para a investigação da vulnerabilidade dos ocupantes nas edificações residenciais e analisam a capacidade adaptativa por meio do uso de estratégias passivas de projeto em três cidades brasileiras. Considera-se o cenário de emissões SSP5-8.5 do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC como os riscos a serem enfrentados, com o intuito de propor recomendações projetuais para obter melhores condições de conforto térmico em tempos de mudanças climáticas. Nesse sentido, surgem os seguintes questionamentos:

- a) Os ocupantes das edificações residenciais estão em vulnerabilidade hoje e estarão no futuro?
- b) Até que ponto a adoção de estratégias passivas de projeto será eficaz na redução da vulnerabilidade dos ocupantes em relação às altas temperaturas internas?
- c) Com a adoção de estratégias passivas de projeto e o ajuste da capacidade de resfriamento e aquecimento, e do termostato do sistema de condicionamento de ar, será possível reduzir o consumo energético dos sistemas artificiais, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é investigar as condições térmicas internas de um edifício multifamiliar padrão diante do cenário de emissão SSP5-8.5 do Sexto Relatório do IPCC (AR6), a fim de identificar situações de vulnerabilidade dos ocupantes e analisar a capacidade das estratégias passivas de projeto como medidas de adaptação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar a severidade e intensidade de um evento de calor de uma habitação padrão no período histórico e nas projeções climáticas futuras de 2050 e 2080, considerando a temperatura efetiva padrão.
- b) Investigar as horas em vulnerabilidade dos ocupantes no interior de uma habitação padrão no período histórico e nas projeções climáticas futuras de 2050 e 2080, considerando a resposta fisiológica e a sensação térmica.

- c) Analisar o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono de uma habitação padrão no período histórico e nas projeções climáticas futuras de 2050 e 2080.
- d) Apontar a eficácia das estratégias passivas de projeto na adaptação das habitações e na mitigação das emissões de dióxido de carbono oriundas do consumo energético frente aos cenários de mudanças climáticas.

1.3 HIPÓTESES

No cenário histórico e futuro próximo, a temperatura efetiva padrão dos ambientes será superior a 35,0°C, deixando as estratégias passivas de projeto aplicadas em edificações residenciais ineficazes para proporcionar ambientes confortáveis, mas significativas para reduzir o consumo de ar-condicionado de maneira a contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

1.4 ALCANCE DA PESQUISA

Toda pesquisa possui delimitações ligadas ao contexto e às condições em que foram realizadas, sejam essas teóricas, metodológicas ou práticas. Apesar do avanço dos modelos climáticos e das atualizações constantes dos relatórios sobre mudanças climáticas, o entendimento da progressão dos efeitos do aquecimento global e das alterações climáticas é de difícil compreensão e reprodução, o que limita a utilização desses modelos, em função dos níveis de incerteza envolvidos.

Com relação às delimitações deste estudo, é importante considerar que a pesquisa se restringiu ao Sexto Relatório (AR6) do IPCC como base para avaliar as condições internas e orientar a construção de diretrizes de projeto para habitações, incorporando os efeitos do aquecimento global e, por conseguinte, das mudanças climáticas do século XXI. Esse relatório foi escolhido devido à sua consolidação na literatura e acadêmica, além de apresentar projeções climáticas futuras.

A escolha do cenário de emissões SSP5-8.5 foi motivada por ser o cenário mais pessimista do relatório, caracterizado pelo uso intensivo de combustíveis fósseis e pelo aumento de temperatura de até +5,0°C, sendo semelhante ao cenário RCP8.5 do Quinto Relatório (AR5) do IPCC. A justificativa para essa escolha é que, se as diretrizes propostas reduzirem a vulnerabilidade dos ocupantes das edificações no cenário pessimista, é provável que sejam ainda mais eficazes em cenários com projeções de temperaturas menores e menos extremas.

Considerando o método adotado para a preparação dos arquivos climáticos futuros, a aplicabilidade, principalmente, para o futuro próximo (cenário de 2050), fica restrita às cidades que possuem arquivos climáticos referentes ao período de 1985-2014 em um formato adequado para a ferramenta "*Future Weather Generator*". Portanto, os arquivos referentes ao período histórico se limitam ao *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) para as três cidades analisadas nesta pesquisa, em função de sua maior concordância com o período histórico usado como base para as projeções, conforme indicado na documentação da ferramenta. A escolha desta ferramenta, também, decorre pelo formato de inserção e saída do arquivo, ambos no formato "*EnergyPlus Weather Data (EPW)*", contribuindo para a utilização do software de simulação computacional de desempenho termoenergético EnergyPlus.

Outra limitação importante deste estudo está relacionada à escolha do índice de avaliação das condições internas da habitação como referência. O índice de Temperatura Efetiva Padrão (SET) leva em consideração variáveis internas da edificação, incluindo a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. No entanto, devido a uma limitação na capacidade de calcular a velocidade do vento nos interiores dos ambientes da ferramenta de simulação, a saber o EnergyPlus, versão 9.0, a velocidade do vento foi fixada em 0,10 m/s, o que representa uma velocidade de ar baixa ou calma.

Por fim, é importante destacar que esta pesquisa apresenta limitações nas extrapolações de seus resultados perante a impossibilidade de testes e comparações práticas. Isso ocorre porque o estudo se baseia em projeções e tendências de aumento de temperaturas do ar globais futuras específicas para um recorte regional, abrangendo as cidades de Manaus-AM, Cuiabá-MT e Florianópolis-SC.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese é composta por cinco capítulos, a saber:

O capítulo 1, intitulado "Introdução", compreende a apresentação do assunto abordado, focando nos conceitos que fundamentam a definição do objetivo geral e dos objetivos específicos. Além disso, são apresentados o ineditismo desta pesquisa, as hipóteses e o alcance da pesquisa.

No capítulo 2, o "Referencial Teórico" propõe um aprofundamento na temática das mudanças climáticas, consideradas como um fenômeno real, a partir do qual surgem alterações sociais, econômicas e ambientais. Além disso, são abordados os riscos dos impactos das mudanças

climáticas para os ocupantes de edificações residenciais, incluindo o superaquecimento interno, a vulnerabilidade e até mesmo os riscos de mortalidade. Por fim, são discutidas as medidas para a adaptação climática de edificações, principalmente, as medidas passivas e bioclimáticas de projeto.

No capítulo 3, denominado “Estudos Pilotos para o Aprimoramento da Metodologia da Pesquisa”, é apresentado um fluxograma do processo metodológico, e se escolhe como objeto de estudo uma habitação padrão amplamente construída nas regiões de estudo, a saber: Manaus, Cuiabá e Florianópolis. São estabelecidas especificações mínimas para a adequação do objeto de estudo de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2021). Além disso, é descrito o processo metodológico adotado na pesquisa, assim como um estudo sobre os ganhos de calor em fechamentos opacos e transparentes, com o objetivo de identificar qual fechamento apresenta maior impacto nos ganhos de calor e, assim, adaptá-los para reduzir esses impactos e melhorar as condições internas da habitação.

No capítulo 4, intitulado “Metodologia”, são apresentados os procedimentos metodológicos para atingir os objetivos da pesquisa. São elaborados os arquivos climáticos representativos dos períodos de 2050 e 2080, que serão utilizados para estimar o impacto das mudanças climáticas nas estratégias passivas de projeto e no estudo das condições internas da habitação. A avaliação das condições internas das tipologias envolve a investigação da severidade e intensidade do evento de calor, bem como das horas em que os ocupantes estão vulneráveis nos ambientes de permanência prolongada. Por fim, é estimado o consumo energético do sistema de resfriamento artificial e se investiga o prognóstico das emissões de dióxido de carbono decorrentes desse consumo.

O capítulo 5 consiste nos “Resultados e Discussões”, em que são apresentados os resultados obtidos em termos dos impactos das mudanças climáticas e da avaliação das condições internas das tipologias construtivas com a implementação das estratégias passivas e bioclimáticas. São analisados os aspectos de severidade, intensidade e horas em vulnerabilidade dos ocupantes, no período histórico e futuros (2050 e 2080), estabelecendo relações entre os sistemas construtivos de paredes e coberturas com as estratégias passivas, a fim de fornecer diretrizes construtivas que promovam maior resiliência térmica das habitações.

No capítulo 6, intitulado “Considerações Finais”, contemplam-se as conclusões obtidas da análise dos resultados e se apresentam sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

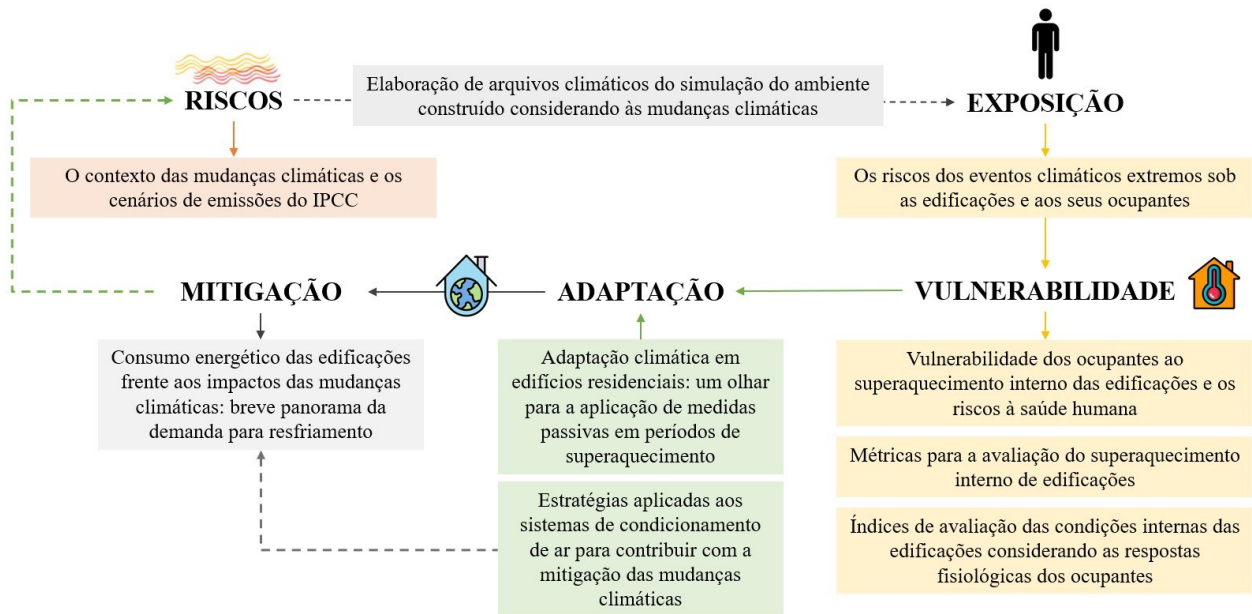
O referencial teórico se baseia nos conceitos explorados na pesquisa, que são os seguintes: riscos, exposição, vulnerabilidade, adaptação e mitigação.

No que se refere ao conceito de riscos, o primeiro subtópico contextualiza os relatórios do IPCC e seus cenários de emissões, com o objetivo de situar os riscos associados a ondas de calor, elevadas temperaturas e eventos extremos. No segundo subtópico se destaca o conceito de exposição, no qual são apresentados métodos e ferramentas para a elaboração de arquivos climáticos visando a simulação do ambiente construído considerando as mudanças climáticas. Isso possibilita a investigação dos riscos enfrentados pelos ocupantes expostos no interior das edificações. No terceiro subtópico são abordados os riscos que os ocupantes enfrentam, incluindo as ondas de calor e o superaquecimento interno das edificações.

O conceito de vulnerabilidade é abordado no quarto subtópico, o qual contextualiza a suscetibilidade dos ocupantes ao superaquecimento interno das edificações e os riscos associados à saúde humana. São discutidas métricas para avaliar o superaquecimento interno das edificações, além de serem apresentados índices para avaliar as condições internas dessas edificações, levando em consideração as respostas fisiológicas dos ocupantes. O quinto subtópico oferece um panorama das pesquisas que investigaram a adaptação climática em edificações residenciais, com foco principalmente nas medidas passivas de projeto durante períodos de superaquecimento. O intuito deste subtópico é fornecer subsídio para determinar as estratégias a serem implementadas nas simulações desta pesquisa.

No que diz respeito ao conceito de mitigação, o sexto subtópico apresenta um breve panorama da demanda de resfriamento em edificações diante dos impactos das mudanças climáticas. Além disso, explora as estratégias que estão sendo empregadas para reduzir o consumo energético dos sistemas artificiais, contribuindo, assim, para a diminuição das emissões de dióxido de carbono e, por conseguinte, para a mitigação das mudanças climáticas. Para consolidar os subtópicos se apresenta um diagrama conceitual da elaboração dos capítulos do referencial teórico na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama conceitual dos capítulos do referencial teórico com base nos conceitos da pesquisa



Fonte: a autora (2023)

2.1 O CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E OS CENÁRIOS DE EMISSÕES DO IPCC

Conforme o IPCC (2018), o sistema climático é altamente complexo, composto por cinco principais componentes: atmosfera, hidrosfera, criosfera, litosfera e biosfera, e suas interações. Esse sistema evolui no tempo sob a influência de sua própria dinâmica e de forças externas, como erupções vulcânicas, variações solares e forçantes antropogênicas, como mudanças na composição da atmosfera e no uso da terra (IPCC, 2018).

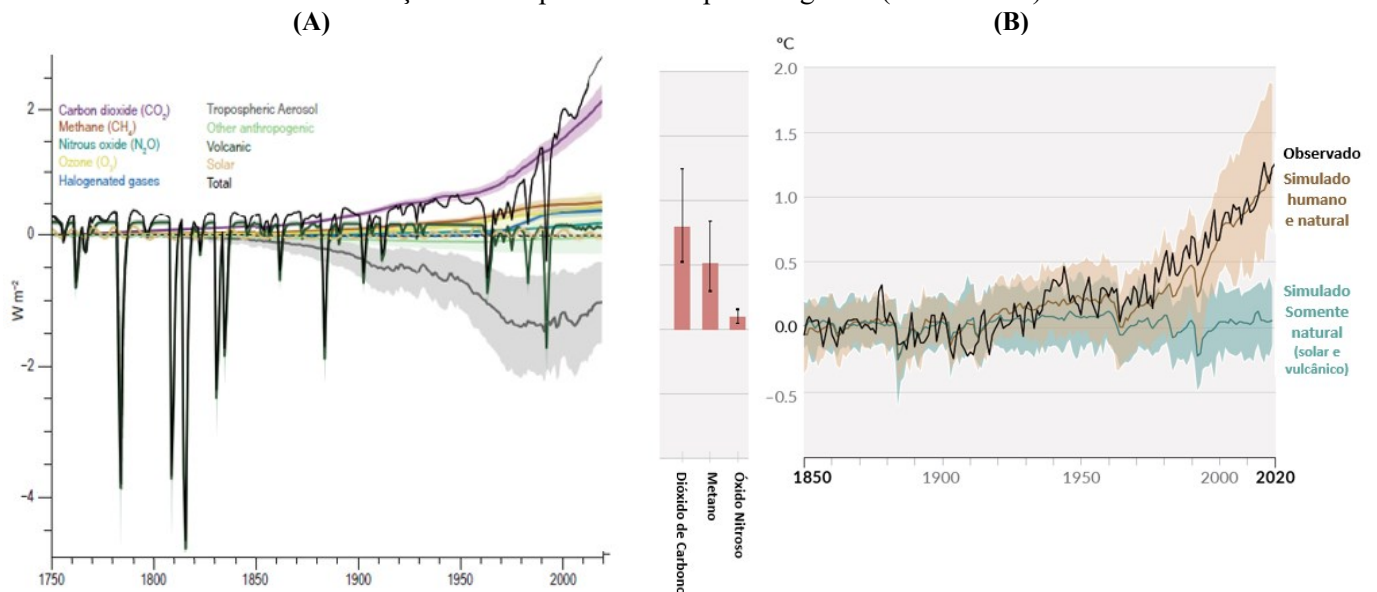
O sistema climático possui gases naturais e de origem antropogênica, denominados Gases de Efeito Estufa (GEE). Esses gases incluem vapor de água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e ozônio (O₃). Além disso, existem outros gases de efeito estufa produzidos, exclusivamente, pelo ser humano na atmosfera, como halocarbonos e outras substâncias contendo cloro e bromo (IPCC, 2018). Alguns desses gases foram abordados no Protocolo de Montreal e no Protocolo de Kyoto, como os hexafluoreto de enxofre (SF₆), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorocarbonos (PFCs) (IPCC, 2018). Esses gases diferem em seus efeitos no aquecimento do sistema climático global em função de suas propriedades radiativas distintas e ao tempo de vida na atmosfera.

Nesse contexto, as emissões de GEE resultantes da queima de combustíveis fósseis prejudicaram a qualidade do ar e impactaram o sistema climático, causando alterações climáticas

em um ritmo acelerado. Segundo o IPCC (2021), os aumentos observados nas concentrações de GEE são atribuídos às atividades antropogênicas desde 1975 e tendem a aumentar na atmosfera, alcançando médias anuais de 410 ppm de CO₂, de 1.866 ppb de CH₄ e 332 ppb de N₂O em 2019. Esses aumentos contribuem para um Forçamento Radiativo Eficaz¹ (FRE em W/m²) positivo, que tem apresentado aumento desde a Revolução Industrial, destacando-se o CO₂, que ultrapassou 2W/m² após o ano 2000, resultando em um aquecimento superficial terrestre de até 1,2°C (Figura 4-a) (IPCC, 2021).

É muito provável que os GEE tenham contribuído para um aquecimento de 1,0°C a 2,0°C na temperatura superficial global. Cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente desde 1850 (Figura 4-b). A temperatura superficial global, nas duas primeiras décadas do século XXI (2001-2020), foi 1,09°C mais alta do que no período de 1850-1990, com aumento maior na superfície terrestre em comparação com os oceanos (Figura 4-b) (IPCC, 2021).

Figura 4 - Alterações climáticas: A) evolução temporal do Forçamento Radiativo Efetivo (FRE) e B) alterações na temperatura da superfície global (média anual)



Fonte: traduzido de IPCC (2021)

Com o objetivo de consolidar as previsões de aumento da temperatura superficial global, o IPCC tem apresentado cenários de emissões desde 1996, em seus Relatórios Especiais sobre

¹ Conforme o IPCC (2014), o FRE é derivado do Forçamento Radiativo (FR), que representa a alteração no fluxo de energia causada por catalisadores como os GEE e aerossóis. É calculado na tropopausa (parte superior da atmosfera), podendo ser positivo (aquecimento da superfície terrestre) ou negativo (resfriamento da superfície terrestre). O conceito do FR tradicional, presente nos relatórios AR3 e AR4 (IPCC, 2001 e 2007), considera toda a superfície e condições troposféricas fixas. No entanto, nos relatórios recentes AR5 e AR6 (IPCC, 2014 e 2021), as variáveis físicas podem responder a perturbações com ajustes rápidos, o que resulta no cálculo do FRE.

Cenários de Emissões (SRES). No entanto, somente em 2001, no Terceiro Relatório de Avaliação (TAR), foram divulgados quatro grupos de cenários, denominados “famílias”: A1, A2, B1 e B2. Esses cenários consideram as emissões de GEE em seus cálculos e são divididos em 'A' e 'B', representando um compromisso baixo e alto com o desenvolvimento sustentável, respectivamente e em “1” e “2”, relacionados à integração (global) e fragmentação regional (local), respectivamente (Figura 5) (IPCC, 2001).

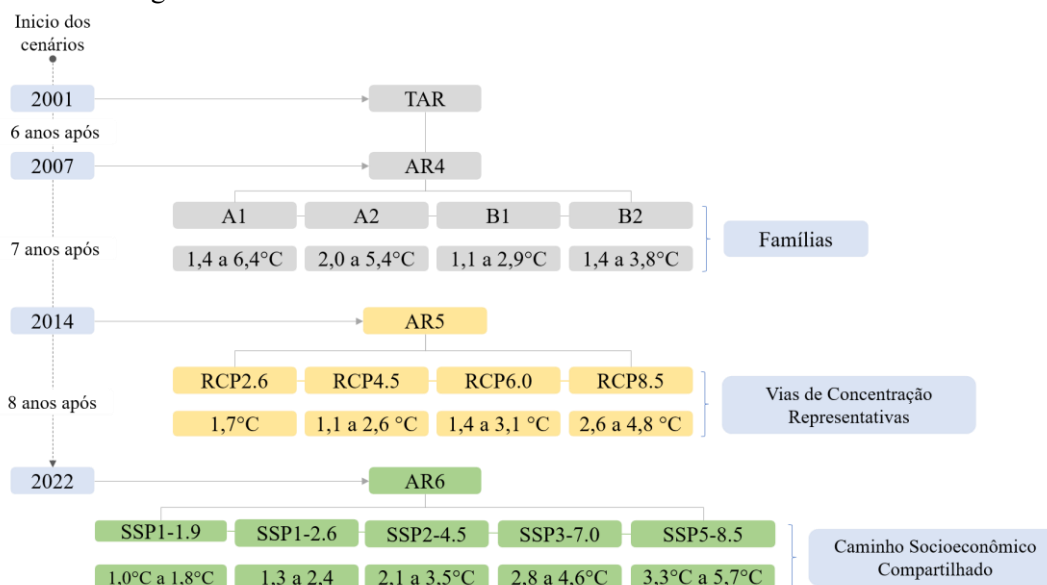
Seis anos depois, em 2007, o IPCC lançou o Quarto Relatório de Avaliação (AR4) (IPCC, 2007), que apresentou os cenários de emissões do TAR, porém com uma maior quantidade de dados observados e avanços na modelagem das mudanças climáticas. Esses avanços permitiram estimativas mais precisas dos prováveis intervalos de aquecimento da temperatura superficial global (Figura 5).

Em 2014, com base em um maior volume de dados observados sobre as emissões de GEE, aspectos socioeconômicos, tecnologias e políticas climáticas, alterações na cobertura do solo e avanços na modelagem global com melhor resolução espacial, o IPCC divulgou os Caminhos de Concentração Representativa (RCP) em seu Quinto Relatório de Avaliação (AR5) (Figura 5). Os RCP descrevem quatro trajetórias distintas: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. O RCP2.6 representa um cenário que visa manter o aquecimento global abaixo de 2,0°C. Esse cenário indica a utilização de fontes de energia limpa e a redução das concentrações de CO₂ na atmosfera. Os RCP4.5 e RCP6.0 são cenários, em que as emissões de GEE se estabilizam em níveis moderados. Por fim, o RCP8.5 representa um cenário com altas emissões de GEE e sem alterações significativas nas políticas de redução e mitigação (IPCC, 2014).

Recentemente, o IPCC divulgou um conjunto de cinco novos cenários ilustrativos de emissões no Sexto Relatório de Avaliação (AR6). Esses cenários apresentam dados mais atualizados sobre as emissões GEE, o uso e ocupação da terra e os poluentes atmosféricos. Além disso, esses cenários conduzem as projeções considerando as alterações no sistema climático, especialmente, o Forçamento Radiativo (FR) (IPCC, 2022).

Esses cenários ilustrativos são denominados Caminho Socioeconômico Compartilhado (SSPs) e são divididos em SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5. O “x” (1, 2, 3 e 5) descrevem as tendências socioeconômicas e o “y” (1.9, 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5) representa os níveis de FR. Esses valores são utilizados como entrada na modelagem das projeções climáticas e são derivados dos RCP do AR5 (Figura 5).

Figura 5 – Resumo dos cenários de emissões dos relatórios do IPCC



Fonte: a autora (2023)

Diferentemente dos cenários anteriores, os SSPs são baseados em futuros possíveis que se diferenciam em desafios socioeconômicos relacionados à mitigação e adaptação às mudanças climáticas, bem como na evolução do FR dentro de cada cenário (Schweizer e O’neill, 2014; Rothman et al., 2013). De acordo com o IPCC (2022), os cinco SSPs representam diferentes perspectivas: sustentabilidade (SSP1-1.9), caminho intermediário (SSP1-2.6), rivalidade regional (SSP2-4.5), desigualdade (SSP3-7.0) e uso intensivo de combustíveis fósseis (SSP5-8.5). O objetivo desse conjunto de cenários é preencher as lacunas identificadas nos RCP do AR5, a fim de melhorar as estimativas do aquecimento climático futuro e refinar os níveis de FR. Portanto, os SSPs são semelhantes aos RCPs no que diz respeito às emissões de GEE (Tabela 3).

Tabela 3 - Visão geral dos cenários SSPs e as semelhanças com os RCPs

Cenários	Descrição dos cenários	Semelhança com os RCPs
SSP1-1.9	Mantém o aquecimento próximo de 1,5°C até 2100 emissões de CO ₂ baixas	Não há cenários semelhantes
SSP1-2.6	Mantém o aquecimento próximo de 2,0°C até 2100 emissões de CO ₂ baixas	RCP2.6
SSP2-4.5	O cenário resulta em um aquecimento estimado próximo de 2,7°C até 2100, e as emissões de CO ₂ permaneceram em torno dos níveis atuais (2021)	RCP4.5 até a projeção de 2050 e o RCP6.0 até 2100
SSP3-7.0	O cenário resulta em um aquecimento estimado próximo de 3,7°C até 2100, e as emissões de CO ₂ praticamente dobram em relação aos níveis atuais (2021) até a projeção de 2050, e incluem altas emissões de aerossóis	Entre os RCP6.0 e RCP8.5, embora consideram as emissões de aerossóis maiores em relação aos RCPs
SSP5-8.5	O cenário resulta em um aquecimento estimado próximo de 4,5°C até 2100, e as emissões de CO ₂ praticamente dobram em relação aos níveis atuais (2021) até o final do século, e incluem altas emissões de aerossóis	RCP8.5, com emissões de CO ₂ mais altas no final do século

Fonte: adaptado de IPCC (2022)

Segundo os alertas do IPCC, em seus relatórios, as alterações climáticas têm um impacto direto no sistema climático, no meio ambiente, na sociedade, nas cidades e na população. Esses impactos incluem o aumento da temperatura superficial global, o aumento das emissões de GEE e aerossóis na atmosfera, ocorrência de ondas de calor, precipitações mais intensas em algumas regiões, secas severas e aumento de eventos climáticos extremos, como ciclones e tempestades intensas.

Além disso, as mudanças climáticas podem reduzir a segurança alimentar e hídrica, bem como afetar, negativamente, a saúde das pessoas, elevando a mortalidade e morbidade humana, principalmente em indivíduos vulneráveis, como crianças, pessoas com doenças crônicas, trabalhadores ao ar livre e idosos. Pessoas que vivem em áreas urbanas são mais afetadas pela exposição ao calor em comparação com aquelas que vivem em áreas rurais (Manyuchi et al., 2022; IPCC, 2022).

Os ambientes urbanos são um dos maiores contribuintes para as emissões de GEE e são afetados diretamente pelos impactos das mudanças climáticas, em decorrência da combinação de altas temperaturas, poluição do ar e alta densidade populacional, o que resulta em impactos na saúde humana (IPCC, 2022). Os extremos quentes, como ondas de calor e fenômenos como ilhas de calor urbanas, se intensificam nas cidades, causando estresse térmico e condições insalubres. Além disso, esses extremos também agravam a poluição do ar e afetam a infraestrutura local (Baqá et al., 2022; Dhorde et al., 2022; Tariq et al., 2022; IPCC, 2022).

Esses impactos atingem, principalmente, os moradores de assentamentos de baixa renda ou informais, que frequentemente não possuem infraestrutura, serviços públicos e recursos financeiros para enfrentar os extremos quentes e manter condições de conforto térmico, representando assim um risco para a saúde dessa população. Portanto, é crucial tomar medidas para mitigar e se adaptar às mudanças climáticas, a fim de reduzir seus impactos negativos e promover um futuro sustentável para as gerações presentes e futuras.

2.2 ELABORAÇÃO DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS PARA SIMULAÇÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO CONSIDERANDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A consideração dos impactos do aquecimento global nos arquivos climáticos é essencial para a investigação das condições térmicas internas e para a previsão da demanda energética em edifícios, principalmente, com o intuito de torná-los resilientes no futuro. A discussão sobre os impactos nos arquivos climáticos começa pela utilização de arquivos históricos como base para as

projeções futuras do clima. Esses arquivos históricos servem como um ponto de referência para compreender o impacto no clima futuro.

Além disso, essa discussão se estende às ferramentas de geração de arquivos climáticos futuros. É importante destacar que esses arquivos projetados podem alterar as temperaturas e outras variáveis climáticas, tais como umidade, velocidade do vento, radiação solar e precipitação. Essas variáveis são influenciadas por padrões de emissão de GEE e outros fatores climáticos, com o objetivo de criar arquivos climáticos que reflitam as condições esperadas no futuro.

Com o aumento das temperaturas globais e as projeções futuras, os arquivos climáticos utilizados em simulações do ambiente construído, muitas vezes baseados em dados históricos, não são robustos para definir o desempenho térmico e energético presente e futuro dos edifícios. Em outras palavras, ao utilizar esses arquivos, as condições são simuladas considerando o passado e não se aplicam estratégias nas edificações para enfrentar as mudanças climáticas.

Os primeiros conjuntos de dados climáticos horários incluíram os *Test Reference Year* (TRY), que abrangem variáveis como temperatura de bulbo seco e úmido, ponto de orvalho, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, umidade relativa e cobertura de nuvens (Crawley e Lawrie, 2015). Entretanto, tais conjuntos não incorporavam dados solares medidos ou calculados. O TRY, baseado em um ano histórico real entre 1950 e 1970, seleciona um único ano com temperaturas moderadas após a exclusão de anos extremos. Para superar as limitações do TRY, o National Climatic Data Center (NCDC) desenvolveu o conjunto *Typical Meteorological Year* (TMY), utilizando dados de 1961-1990. Esse conjunto incorpora informações sobre radiação solar total horizontal e direta normal, selecionando meses que correspondem às médias mensais de longo prazo, resultando em um ano tipicamente representativo (Crawley e Lawrie, 2015).

O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) produz arquivos climáticos baseados em medições históricas para recursos energéticos renováveis, aplicáveis também ao *EnergyPlus* (Scheller et al., 2015). Por fim, o banco de dados TMYx, apresentado por Crawley e Lawrie, oferece anos meteorológicos típicos até 2021. Esse banco possui dois tipos de registros: um baseado em dados de longo prazo, abrangendo até 82 (oitenta e dois) anos, e outro derivado dos últimos 15 (quinze) anos, contemplando condições climáticas recentes, incluindo mudanças climáticas e urbanização (Bre et al., 2021).

No entanto, para incorporar as mudanças climáticas nos dados históricos e atuais, é necessário adotar o método de *downscaling* juntamente com um Modelo de Circulação Geral (GCM). O *downscaling* se refere a uma combinação de métodos que permitem modelar as

interações climáticas atuais com as anomalias futuras, a fim de obter previsões em escala local a partir de projeções em larga escala fornecidas por um GCM (Trzaska e Schnarr, 2014). Essa abordagem engloba cinco processos principais: *downscaling* dinâmico, *downscaling* estatístico, geração de clima estocástico, interpolação e ajustes de séries temporais (*Morphing*) (Tabela 4).

Tabela 4 - Processos metodológicos de *downscaling*

Downscaling dinâmico	Apresenta resolução mais fina, que contém informações regionais, permitindo incluir nas simulações como o relevo local. Esse procedimento é conhecido como Regional Climate Model (RCM).
Downscaling estatístico	Podem ser divididas em métodos lineares, classificações meteorológicas e geradores climáticos, os quais fornecem sequências climáticas com base em arquivos climáticos históricos.
Geração de clima estocástico	São séries meteorológicas sintéticas geradas para reproduzir o clima futuro. Embora este método seja computacionalmente mais barato, requer longas séries meteorológicas para treinar o modelo.
Interpolação	Consiste em interpolar dados obtidos dos arquivos climáticos históricos com os dados dos modelos de GCMs.
Ajustes de séries temporais	Consiste em ajustar dados observados obtidos de estações meteorológicas com base em dados fornecidos por modelos de circulação geral e modelos climáticos regionais. Esse método é conhecido como o <i>Morphing</i> .

Fonte: Trzaska e Schnarr (2014)

Entre os métodos citados, o ajuste de séries temporais, conhecido como "*Morphing*", tem sido amplamente utilizado para avaliar os impactos das mudanças climáticas no desempenho térmico e energético do ambiente construído (Baba et al., 2022; Barea et al., 2022; Pajek; Kosir, 2021; Ciancio et al., 2020; Guarda et al., 2020).

Segundo Belcher, Hacker e Powell (2005), essa abordagem oferece duas vantagens: i) a utilização de dados meteorológicos históricos confiáveis como base climática e ii) a probabilidade de que a sequência climática resultante seja meteorologicamente confiável. A aplicação do método *Morphing* envolve: i) desvio no arquivo climático horário atual e adição da variação média mensal projetada (Equação 1), ii) extensão do atual arquivo climático horário por meio do ordenamento da variação média mensal projetada (Equação 2) e iii) combinação das etapas anteriores (Equação 3) (Belcher, Hacker e Powell, 2005). Nesse contexto, x representa a variável climática futura, x_0 representa a variável do arquivo climático atual, Δx_m é a anomalia mensal absoluta de acordo com o modelo de projeções utilizado, a_m é a variação mensal fracionada; $(x_0)_m$ é a média mensal relativa à variável x_0 e m é o mês.

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad \text{Equação 1}$$

$$x = a_m x_0 \quad \text{Equação 2}$$

$$x = x_0 + \Delta x_m + a_m (x_0 - (x_0)_m) \quad \text{Equação 3}$$

O método de Morphing permite a modificação dos valores das variáveis climáticas para representar as previsões dos modelos de circulação, considerando valores médios, máximos e mínimos, ao mesmo tempo em que mantém um comportamento meteorológico realista (Belcher, Hacker e Powell, 2005). Além disso, esse método reduz as previsões dos modelos climáticos de resolução ampla para uma resolução espacial e temporal mais refinada, aprimorando, assim, os resultados das variáveis meteorológicas derivadas dos arquivos climáticos futuros.

Para facilitar a utilização desse método, foram desenvolvidas ferramentas para gestores governamentais, projetistas e simuladores do ambiente construído, com o propósito de obter projeções climáticas e planejar infraestruturas, sistemas e edifícios de maneira adequada às mudanças climáticas (Rodrigues, Fernandes e Carvalho, 2023; Jiang, et al., 2019; Dickinson e Brannon, 2016; Jentsch et al., 2013; Jentsch, Bahaj e James, 2008).

Jentsch et al. (2013) e Jentsch, Bahaj e James (2008) criaram a ferramenta *Climate Change World Weather file Generator* (CCWorldWeatherGen), destinada a simplificar a aplicação do método *Morphing* aos arquivos climáticos atuais, para obtenção dos arquivos climáticos futuros. Essas projeções se fundamentam no Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC e no cenário de emissões A2, utilizando do GCM HadCM3 para os períodos de 2020 (período de 2011-2040), 2050 (período de 2041-2070) e 2080 (período de 2071-2100). A ferramenta é disponibilizada gratuitamente e utiliza da planilha de Excel da Microsoft™ como interface. Para a entrada de dados na ferramenta, os arquivos climáticos de entrada devem representar uma série histórica de 30 anos, sendo recomendado que o período histórico seja de 1961 a 1990, com o intuito de minimizar o impacto das mudanças climáticas nos arquivos base das projeções (Jentsch et al., 2013).

Jiang et al. (2019) desenvolveram o *Weather Morph: Climate Change Weather File Generator*, baseado na metodologia descrita anteriormente. Essa ferramenta emprega três cenários de emissões do AR4 do IPCC: B1, B2 e AIF1. Similarmente à ferramenta CCWorldWeatherGen, o *Weather Morph* utiliza o método *Morphing* para projetar arquivos climáticos futuros, considerando os períodos de 2020 (2011-2040), 2050 (2041-2070) e 2080 (2071-2100). Contudo, é importante ressaltar que a ferramenta encontrou problemas de licenciamento com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), consequentemente, as incertezas e os riscos das projeções realizadas ficam sob a responsabilidade dos usuários.

O grupo de pesquisa Arup e Argos Analytics desenvolveu a ferramenta *WeatherShift™*, que utiliza projeções do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC. Essa ferramenta utiliza o método *Morphing* para gerar projeções com base em 14 GCMs e nos cenários de emissões RCP4.5

e RCP8.5. Os períodos de projeção são 2035 (2026-2045), de 2065 (2056-2075) e de 2090 (2081-2100). É importante mencionar que a ferramenta não é disponibilizada gratuitamente. Para utilizá-la, é necessário fornecer arquivos climáticos representativos de uma série histórica de 30 anos, referentes ao período de 1976-2005. Recomenda-se o uso do arquivo climático SWERA. O método utilizado pela ferramenta é baseado em Função de Distribuição Cumulativa (CDF), construída para cada variável por meio de interpolação linear entre os valores do modelo. Essa abordagem permite que os usuários selecionem uma probabilidade atribuída às projeções, como 5%, 10%, 25%, 50% (aquecimento médio), 75%, 90% ou 95% (aquecimento extremo) (Dickinson e Brannon, 2016).

Rodrigues, Fernandes e Carvalho (2023) desenvolveram a ferramenta *Future Weather Generator*, que está disponível como código aberto para pesquisadores e a sociedade em geral. Essa ferramenta é capaz de gerar projeções climáticas futuras com base nos quatro cenários de emissões do AR6 do IPCC (2022): SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Para a geração das projeções, a ferramenta utiliza do método *Morphing* e se baseia no modelo EC-Earth3, o mesmo utilizado no projeto CMIP6, que serviu como base para o AR6 do IPCC. As projeções geradas abrangem dois períodos futuros: 2050 (2036-2065) e 2080 (2066-2095). O arquivo climático base utilizado é referente ao período de 1985-2014. Os autores recomendam o uso dos arquivos climáticos disponíveis no banco de dados *Climate.OneBuilding.Org* como base para a geração das projeções.

Dessa maneira, as quatro ferramentas empregam o método *Morphing*, diferenciando-se por seus cenários de emissões, período histórico base e variáveis passíveis de alteração em função dos impactos das mudanças climáticas. É importante ressaltar que todas as ferramentas fornecem arquivos de saída em formato EPW, facilitando sua utilização em simulações de desempenho de edifícios. As principais características de cada ferramenta apresentada estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais características das ferramentas de elaboração de arquivos climáticos futuros

Ferramenta	Período histórico	GCMs	Cenário	Período	Arquivo climático*	Variáveis sujeitas a alteração
<i>CCWorldWeatherGen</i>	1961-1990	HadCM3	A2	2020, 2050 e 2080	TMY SWERA	Temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, radiação direta normal, radiação horizontal difusa e velocidade do vento (CongedoO et al., 2021)
<i>Weather Morph: Climate Change Weather File Generator</i>	1961-1990	HadCM3	B1 B2 A1F1	2020, 2050 e 2080	TMY SWERA	Temperatura de bulbo seco, umidade relativa e velocidade do vento (Jiang et al., 2019)
<i>WeatherShift™</i>	1976-2005	14 GCMs	RCP4.5 RCP8.5	2035, 2065 e 2090	TMY SWERA	Temperatura de bulbo seco, umidade relativa, radiação solar direta, velocidade do vento, pressão atmosférica e precipitação (Dickinson e Brannon, 2016)
<i>Future Weather Generator</i>	1985-2014	EC-Earth3	SSP1-2.6 SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5	2050 e 2080	TMYx SWERA	Temperatura de Bulbo Seco, Temperatura Ponto de Orvalho, Umidade Relativa do Ar, Pressão Atmosférica; Radiação Global Horizontal e Velocidade e Direção dos ventos (Rodrigues, Fernandes e Carvalho, 2023)

*Tipo do arquivo climático base sugerido conforme o período histórico base de cada ferramenta.

Fonte: a autora (2023)

Moazami, Carlucci e Geving (2017) compararam as ferramentas *CCWorldWeatherGen* e a *WeatherShift*, identificando diferenças substanciais nos padrões de alteração das variáveis meteorológicas, principalmente, nos valores de radiação solar direta e umidade relativa do ar. Tootkaboni et al. (2021) avaliaram os arquivos climáticos futuros gerados pelas ferramentas *CCWorldWeatherGen* e a *WeatherShift* para simulações do ambiente construído e constataram discrepâncias nas projeções climáticas, principalmente, em relação à temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar. Campagna e Fiorito (2022) destacam que, embora as ferramentas empreguem arquivos climáticos futuros mais recentes podem enfrentar problemas de precisão, confiabilidade e resultados das projeções climáticas futuras. Rodrigues, Fernandes e Carvalho (2023) ressaltam que as ferramentas podem utilizar modelos climáticos globais com resoluções espaciais limitadas, cenários de emissões desatualizados e períodos históricos base muito antigos, o que pode restringir a produção de arquivos climáticos para algumas regiões do mundo.

Além disso, as ferramentas *CCWorldWeatherGen* e *Weather Morph: Climate Change Weather File Generator* apresentam como limitação do uso exclusivo do período histórico base de 1961-1990, restringindo-se às regiões que possuem esses arquivos climáticos disponíveis. Essas ferramentas utilizam cenários de emissões dos primeiros relatórios do IPCC, o que pode limitar a consideração de projeções mais atualizadas.

No caso da ferramenta *Weather Morph: Climate Change Weather File Generator* e *WeatherShift*, não há documentação explícita e detalhada sobre como os cenários de emissões são elaborados, o que impede uma compreensão clara de como exatamente o método *Morphing* é aplicado para elaboração dos arquivos climáticos futuros. Isso pode gerar incertezas em relação à robustez e confiabilidade dos resultados obtidos. Por outro lado, a ferramenta *Future Weather Generator* disponibiliza seu código aberto, permitindo que os pesquisadores tenham acesso e possam verificar o procedimento de cálculo do *Morphing*. No entanto, é importante ressaltar que a ferramenta ainda elabora os arquivos climáticos futuros, mesmo que o usuário não tenha considerado o período de dados históricos e o modelo de GCM indicado no manual de uso ferramenta. Portanto, cabe ao usuário garantir que os dados de entrada tenham sido inseridos corretamente para obter resultados confiáveis.

Evidencia-se que o método *Morphing*, independentemente da ferramenta empregada, pode proporcionar informações adequadas para conduzir análises de desempenho em longo prazo, considerando as mudanças climáticas (Rodrigues, Fernandes e Carvalho, 2023; Hosseini, Bigtashi e Lee, 2021). No entanto, ao optar pela ferramenta a ser utilizada, é fundamental possuir uma compreensão clara do tipo de análise a ser conduzida na pesquisa. Isso ocorre pelo fato de que as ferramentas apresentam incertezas nas projeções e não alteram todas as variáveis climáticas de um arquivo climático base, o que pode afetar os resultados das simulações de desempenho energético e térmico do ambiente construído.

As ferramentas, muitas vezes, são "caixas-pretas" com incertezas em projeções, afetando resultados das simulações, em função de incertezas nos registros climáticos futuros, cenários de emissões e dados históricos. Apesar disso, análises climáticas são valiosas para planejar e mitigar impactos climáticos em edifícios. Interpretar resultados com cuidado, considerando limitações, é crucial. A colaboração entre pesquisadores e especialistas pode aprimorar as ferramentas, reduzir incertezas e melhorar a compreensão dos impactos climáticos, auxiliando na adoção de medidas adequadas de adaptação e mitigação.

2.3 OS RISCOS DOS EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS PARA AS EDIFICAÇÕES E SEUS OCUPANTES

A mudança climática, induzida por fatores antropogênicos, tem aumentado a frequência e intensidade dos eventos extremos no mundo. Há evidências de aumento nas ondas de calor na maioria dos países, enquanto os extremos de frio se tornam menos frequentes e severos (IPCC,

2022). Conforme o IPCC (2021), eventos climáticos extremos são definidos como padrões de clima extremo persistentes e raros em locais e épocas específicas.

Conforme a Organização Meteorológica Mundial (OMM), por meio da análise de dados observados, a temperatura média global em 2020 foi superior em $+1,2^{\circ}\text{C}$ em relação aos níveis pré-industriais. Em 2021, pelo sétimo ano consecutivo (2015-2021), a temperatura global excedeu $+1,0^{\circ}\text{C}$ acima dos níveis pré-industriais (WMO, 2022). O aumento contínuo da temperatura global resultará em eventos extremos de calor mais frequentes, prolongados e intensos, acarretando ondas de calor mais severas em várias regiões do mundo (IPCC, 2022).

As ondas de calor são consideradas uma ameaça severa para a saúde global. Em 2010, na Rússia, uma onda de calor causou 56.000 mortes (Barriopedro et al., 2011), enquanto no verão de 2003, 12 (doze) países europeus tiveram cerca de 71.000 mortes, sendo 50.000 em 2010 (Martín e Paneque, 2022; Hondula et al., 2015). Em junho de 2021, uma onda de calor atingiu a América do Norte, estabelecendo um novo recorde de temperatura $49,6^{\circ}\text{C}$ (WMO, 2021).

Neste contexto, as ondas de calor são definidas pelas temperaturas máximas e pela umidade relativa do ar (Adnan et al., 2022). Estudos sobre ondas de calor e saúde indicam que a temperatura média também pode ser um indicador válido, considerando a frequência e intensidade (Xu et al., 2019). A quantificação varia regionalmente devido a fatores ambientais e antropogênicos locais (Jyoteeshkumar, Perkins-Kirkpatrick e Sharples, 2021). O critério de onda de calor varia: $+5,0^{\circ}\text{C}$ acima do histórico por cinco dias no Reino Unido, média diária acima de $30,0^{\circ}\text{C}$ por cinco dias na Alemanha, e temperaturas máximas acima do histórico por três dias no Brasil (Adnan et al., 2022; Geirinhas et al., 2018).

Com mudanças climáticas atuais e projetadas pelo IPCC, os riscos de ondas de calor tendem a aumentar, intensificando o superaquecimento dos edifícios. Isso ameaça o conforto térmico e a saúde dos ocupantes (Ji et al., 2022). Medidas emergenciais são cruciais, especialmente em edifícios urbanos, para reduzir exposição e vulnerabilidade às altas temperaturas.

O foco deve ser a exposição ao calor em residências, nas quais milhões enfrentam riscos por eventos climáticos extremos (Rana et al., 2022). Cerca de 30% da população global sofre eventos extremos de calor superiores a 20 (vinte) dias, podendo chegar a 74% até 2100 (Mora et al., 2017). Estudos no Reino Unido relatam superaquecimento em 44% dos dormitórios e 29% das salas (Morey, Beizaee e Wright, 2020; Pathan et al., 2017). O risco de superaquecimento é uma realidade do século, exigindo investigação focada na vulnerabilidade dos ocupantes nos edifícios residenciais (White-Newsome et al., 2012; Morey, Beizaee e Wright, 2020; Pathan et al., 2017;

Rana et al., 2022; Mora et al., 2017). Como consequência disso, espera-se que o risco de superaquecimento no interior dos edifícios seja uma realidade a ser enfrentada pela população deste século. Sendo assim, esta pesquisa se volta para a investigação do superaquecimento dos ambientes internos dos edifícios residenciais, com foco na vulnerabilidade de seus ocupantes.

2.3.1 Vulnerabilidade dos ocupantes ao superaquecimento interno das edificações e os riscos à saúde humana

As mudanças climáticas acarretam ameaças significativas ao ambiente construído e à saúde humana. De acordo com Attia et al. (2021), o foco central nas pesquisas sobre mudanças climáticas e superaquecimento interno das edificações é a avaliação da vulnerabilidade dos ocupantes. Os autores enfatizam que a vulnerabilidade abrange os sistemas relacionados aos perigos e fatores de preocupação, ou seja, as próprias edificações e os seus habitantes.

A Organização das Nações Unidas (ONU) define vulnerabilidade como “os riscos e perdas esperadas resultantes das interações entre perigos naturais ou induzidos pelo homem” (ONU, 2002). De acordo com o IPCC (2022), a vulnerabilidade é “a propensão ou predisposição a ser adversamente afetada” e abrange diversos conceitos e elementos, incluindo a sensibilidade a danos e falta de capacidade de lidar e se adaptar. O IPCC também enfatiza que a vulnerabilidade pode ser vista como exposição ao risco climático. Nesse contexto, a exposição é definida como “pessoas, espécies, ecossistemas, funções, serviços, recursos ambientais, infraestrutura, sociais, culturais, que podem ser afetadas negativamente”, ou seja, que estão em zona de risco e sujeitos a perdas potenciais (IPCC, 2021).

Assim, a vulnerabilidade está intrinsecamente ligada aos efeitos das mudanças climáticas sobre um sistema exposto a variações climáticas, eventos extremos e projeções futuras. Para considerar que os ocupantes de edificações enfrentam vulnerabilidade, o sistema deve manifestar sensibilidade as interrupções ou falhas, ou seja, a incapacidade de proteger os ocupantes contra altas temperaturas internas ou quedas no fornecimento de energia elétrica, resultando em mortes ou morbidade relacionadas ao calor (Attia, Mustafa e Singh, 2019). Portanto, os ocupantes ficam vulneráveis quando as edificações ou o sistema carecem da capacidade de enfrentar e adaptar-se aos impactos das mudanças climáticas tanto no presente quanto no futuro.

No contexto das edificações, avaliar a vulnerabilidade dos ocupantes requer uma análise do desempenho térmico e das condições internas frente às diferentes perturbações climáticas, sejam essas de curta duração, como as ondas de calor, ou de longa duração, como as mudanças climáticas

(Attia et al., 2021). Burman, Kimian e Mumovic (2014) associam a vulnerabilidade dos ocupantes no interior das edificações em três aspectos principais: grau de exposição, sensibilidade e capacidade de resposta, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Esferas da vulnerabilidade dos ocupantes no interior das edificações

Esfera	Definição	Aplicação ao superaquecimento dos edifícios
Grau de exposição	Grau, duração e extensão em que o sistema está sujeito as perturbações.	Condições climáticas futuras considerando as mudanças climáticas
Sensibilidade	Grau em que o sistema é modificado ou afetado por perturbação interna ou externa.	Faixa de temperaturas internas alcançadas.
Capacidade de resposta	A capacidade de um sistema de lidar com uma perturbação.	Número previstos de horas abaixo de uma temperatura limite.

Fonte: adaptado de Burman, Kimian e Mumovic (2014)

Mac e McCauley (2017) evidenciam que o grau de exposição indica o nível em que altas temperaturas ou ondas de calor ameaçam a população, infraestrutura, serviços e recursos ambientais. A exposição é influenciada pela frequência, intensidade e duração desses eventos (Hatvani-Kovacs et al., 2016). A sensibilidade, por sua vez, está relacionada às condições enfrentadas por um indivíduo e depende de diversos fatores, como idade, sexo, peso, grau de aclimatação, condições médicas, situação econômica, entre outros (Azhar et al., 2017). Por fim, a capacidade de resposta é o último componente da vulnerabilidade dos ocupantes, dizendo respeito à habilidade de indivíduos, comunidades ou cidades em se adaptarem aos efeitos adversos das altas temperaturas (Raja et al., 2021).

Diferentes níveis de exposição ao superaquecimento de edificações testam a adaptabilidade dos edifícios, que podem apresentar efeitos adversos no conforto térmico, saúde e qualidade de vida dos seus ocupantes. Liu et al. (2012) salientam que a exposição pode ser considerada uma métrica para avaliar a duração e/ou frequência do estresse em um sistema, sendo essencial para compreender a vulnerabilidade de uma população às alterações climáticas. Wollschlaeger et al. (2022) fornecem exemplos de exposições aos impactos das mudanças climáticas, como incêndios florestais, secas, calor extremo, inundações, tempestades, precipitação extrema, deslizamentos de terra ou agentes infecciosos. Wang et al. (2020) prognosticam um aumento de quatro a oito vezes na exposição às ondas de calor até o final do século em termos de frequência, duração e intensidade.

No âmbito da saúde humana, a exposição ao calor afeta, negativamente, o bem-estar e a satisfação térmica das pessoas, resultando em baixa energia e problemas emocionais (Arifwidodo e Chandrasiri, 2020). Sintomas físicos como sede excessiva, sudorese, tontura, náusea e dores de cabeça podem ter impactos leves a graves na saúde humana, podendo até levar a óbito (Kovats e Hajat, 2008). Koteswara et al. (2020) preveem uma diminuição de até 40% na produtividade dos

trabalhadores na Índia em decorrência do aumento do estresse térmico até o final do século. Além disso, há evidências de que, em regiões de climas amenos, os impactos na saúde decorrentes do calor podem ser severos, uma vez que as pessoas não possuem experiência de aclimação, aumentando assim as taxas de mortalidade (Beckmann, Hiete e Beck, 2021).

Nesse contexto, as necessidades de conforto humano estão intrinsicamente ligadas ao funcionamento do organismo. Como seres humanos são organismos homeotérmicos, esses possuem a necessidade fisiológica de manter a temperatura corporal em torno de 37,0°C, com variações que podem oscilar entre 37,5°C e 38,0°C (Parsons, 2006; Roaf, Crichton e Nicol, 2005). Até essas temperaturas, é possível que uma pessoa pode ser resfriada por meio da convecção. No entanto, acima desses valores, a dissipação de calor por convecção não é possível, uma vez que o ar ambiente passa a aquecer o corpo, em vez de resfriá-lo (Zune, Rodrigues e Gillott, 2020). A alta umidade também prejudica a eficácia do resfriamento evaporativo e, quando combinada com altas temperaturas do ar, pode comprometer o mecanismo de resfriamento do corpo humano, resultando em ameaças à saúde (Mora et al., 2017).

Basu e Samet (2022) realizaram um estudo com idosos e constatam que, para cada aumento de 0,55°C na temperatura média do ambiente, a temperatura corporal média aumentava cerca de 0,083°C. Kim et al. (2012), ao analisarem idosos na China, observaram que a cada aumento de 1,0°C na temperatura interna, a temperatura corporal média aumentava cerca de 0,21°C. Bidassey-Manilal et al. (2016) aplicaram um questionário a alunos e realizaram medições do ambiente interno, verificaram que a maioria dos alunos se sentia confortável em temperaturas entre 20°C e 27°C, com umidade relativa entre 35% e 60%, mas achavam difícil respirar em temperaturas e umidade superiores a 32°C e 70%.

Kranc et al. (2021) destacam que o calor excessivo e baixa umidade podem aumentar o risco de paradas cardíacas, levando ao óbito. Zune, Rodrigues e Gillot (2020) explicam que em ambientes com temperaturas em torno de 32,0°C e alta umidade relativa do ar, o corpo humano não consegue manter sua temperatura central de 37,5°C, limitando a capacidade de transpiração. Já as mesmas temperaturas, ou até mais altas, em condições áridas, com baixa umidade, são mais toleráveis, em função do aumento da capacidade de resfriamento via transpiração.

Nesse sentido, observa-se que a combinação de alta temperatura e alta umidade relativa não pode ser negligenciada nas avaliações de conforto térmico para os ocupantes, principalmente em dias quentes, em períodos de ondas de calor e diante do superaquecimento interno dos edifícios. Além disso, eventos de calor podem ser sucessivos e contínuos, tornando os ambientes internos

das edificações quentes por longos períodos, desencadeando respostas fisiológicas humanas negativas. Contudo, condições extremas de temperaturas elevadas podem causar estresse térmico nos ocupantes das edificações, levando rapidamente a tensões fisiológicas e, potencialmente, à mortalidade. Isso ocorre quando a temperatura central do corpo aumenta, consequentemente aumentando a frequência cardíaca (Taylor et al. 2023).

Portanto, em vista da percepção térmica dos ocupantes, ambientes desconfortáveis em função do superaquecimento diferem da percepção instantânea de desconforto térmico. O superaquecimento, objetivamente, denota o efeito acumulativo do calor, enquanto, subjetivamente, indica a insatisfação do ocupante com as condições do ambiente. Isso releva os níveis de estresse térmico e o risco do aquecimento interno para a saúde humana (Laouadi, et al., 2023). Dessa maneira, observa-se que avaliar as condições internas das edificações considerando apenas a temperatura do ar pode não representar os riscos das altas temperaturas para a saúde humana. A inclusão da umidade relativa nas avaliações se torna importante para possibilitar uma resposta fisiológica em relação ao ambiente e, assim, verificar se o ocupante pode estar vulnerável ao calor.

2.3.2 Métricas para a avaliação do superaquecimento interno em edificações

A definição de superaquecimento interno ainda carece de uma aceitação global uniforme, pois essa definição varia de acordo com o clima e os grupos expostos (Escandón et al., 2022; Szagri e Szalay, 2022). Parâmetros como idade, sexo, renda, tipo de edificação e sistema construtivo estão associados à percepção de calor dos ocupantes nos ambientes internos (Hass e Ellis, 2019).

O superaquecimento em edifícios tem gerado inúmeras preocupações relacionadas à saúde, particularmente entre idosos, crianças e pessoas vulneráveis durante ondas de calor ou períodos de altas temperaturas (Alves, Duarte e Gonçalves, 2021; Laouadi, Bartko e Lacasse, 2020). Nesse contexto, a avaliação da vulnerabilidade dos ocupantes ao superaquecimento interno dos edifícios, considerando os cenários climáticos futuros, deve fazer parte do processo de projeto com o intuito de se projetar, nos dias atuais, edifícios resilientes para suportar as condições climáticas futuras.

Os episódios de superaquecimento interno são categorizados de acordo com duração, intensidade e severidade, e podem ser divididos em três tipos principais: prolongados, intensos e graves. Episódios prolongados são tipicamente leves, enquanto os intensos ocorrem em períodos curtos e os graves combinam características dos prolongados e intensos (Zune, Rodrigues e Gillott, 2020).

Dessa maneira, a literatura científica apresenta diversas métricas para avaliar a vulnerabilidade dos ocupantes ao superaquecimento interno (Tabela 7). Zeng et al. (2022) emprega a métrica Graus-Hora não Atendidos (UDH), com um limite de temperatura derivado do modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020). Os autores destacam que o UDH indica até que ponto a capacidade de resfriamento de um sistema é insuficiente durante uma onda de calor. Gamero-Salinas et al. (2021) analisam o risco do superaquecimento usando duas métricas: i) Horas de Excedência (He), que quantifica o tempo em que a condição térmica de um espaço ocupado está fora da zona de conforto do modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020), e ii) Grau de Superaquecimento Interno (IOD), que calcula o risco considerando intensidade e frequência, sendo proposto no *IEA Annex 80: Cooling Resilience for Buildings* (Hamdy et al., 2017).

Rahif et al. (2022) também adotam o IOD para quantificar o superaquecimento de edificações, salientando que a métrica considera temperaturas operativas internas, incorporando o efeito da umidade, o que poderia subestimar a severidade do risco em dias com altas temperaturas e umidade relativa. Ressalta-se que o IOD pode avaliar a frequência do superaquecimento, mas não o grau e intensidade nos ambientes internos (Gamero-Salinas et al., 2021). Escandón et al. (2022), Hayles et al. (2022) e Gupta e Gregg (2020) empregam as três métricas definidos na TM59, que são: i) horas de excedência, que estabelece a porcentagem de horas em que a temperatura operativa excede a máxima em até 3%, em que a temperatura máxima é definida pelo critério de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020); ii) excesso ponderado diário, que avalia a gravidade do superaquecimento diário em termos de aumento da temperatura e duração, limitando a 6°C/dia, e iii) temperatura limite superior, que determina se a temperatura interna máxima não ultrapasse +4°C. Entretanto, esses critérios podem não considerar adequadamente a adaptação dos ocupantes a climas mais quentes, principalmente, em edifícios naturalmente ventilados, e podem subestimar os impactos das mudanças climáticas.

Laouadi, Bartko e Lacasse (2020) utilizam a Temperatura Efetiva Padrão (SET), que diferencia diversos tipos de eventos de superaquecimento com várias severidades e durações ao longo de um período. Esses eventos são avaliados considerando exposições noturnas (SEV_n), e diurnas (SEV_d) e ambas (SEV_t), incorporando condições internas como a temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade relativa e velocidade do vento, além de considerações sobre os ocupantes, como vestimentas e atividade metabólica. Zune, Rodrigues e Gillot (2020) utilizam o índice de calor, que mensura o grau de estresse térmico baseado na temperatura e umidade relativa do ar interno do ambiente. Esse índice é dividido em quatro estágios de estresse térmico: i) cuidado,

ii) cuidado extremo, iii) perigo e iv) perigo extremo. Contudo, os autores mencionam a limitação do índice, já que a velocidade do vento é considerada fixa em 1,0m/s, porém se sabe que velocidades superiores ou inferiores afetam as condições de conforto térmico no interior de um edifício. A Tabela 7 apresenta o resumo das métricas de superaquecimento interno.

Tabela 7 - Resumo das métricas de superaquecimento interno em edificações residenciais

Critérios	Métricas para os limites	Limites	Autor
Graus-hora não atendidas (UDH)	Modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020)	25,5°C	Zeng et al. (2022)
Horas de excedência (He)	Modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020)	28°C	Gamero-Salinas et al. (2021)
Horas de excedência (He); Excesso Ponderado Diário (We) e Temperatura Limite Superior (Top)	Critérios da TM59 (CIBSE, 2017)	26°C (quartos) 28°C (sala)	Escandón et al., (2022); Hayles et al. (2022); Gupta e Gregg (2020)
Grau de superaquecimento interno (IOD)	Modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020)	28°C 26°C	Gamero-Salinas et al. (2021) Rahif et al. (2022)
Temperatura Efetiva Padrão (SET)	Severidade e intensidade (Laouadi, Bartko e Lacasse, 2020)	30°C	Laouadi, Bartko e Lacasse (2020)
Temperatura de Bulbo Seco, Bulbo Úmido e Umidade Relativa	Índice de calor (IC) (NOAA, 2022)	IC < 26°C sem estresse térmico 26°C < IC < 32°C cuidado 32°C < IC < 41°C extremo cuidado 41°C < IC < 54°C Perigo IC > 54°C extremo perigo	Zune, Rodrigues e Gillott (2020)

Fonte: a autora (2023)

Essas métricas podem ser categorizadas em duas abordagens principais: i) aquelas que enfatizam o conforto térmico dos ocupantes, como a UDH e TM59, e ii) aquelas que priorizam a saúde dos ocupantes, ou seja, identificam o risco de estresse térmico dos ocupantes, como a SET e IC. Apesar de suas diferenças, todas visam quantificar as condições internas dos ambientes com foco nos ocupantes, mas incorporam em suas equações a temperatura operativa interna, a temperatura máxima interna do ar, limites de conforto com baseados no modelo adaptativo e a umidade relativa interna do ar (Tabela 8), deixando de lado outras variáveis ambientais e humanas cruciais para avaliar os impactos das altas temperaturas na saúde humana.

Tabela 8 – Demonstração das equações de superaquecimento interno de edificações residenciais

Crítérios	Equação	Legenda	
Graus-hora não atendidas (UDH)	$UDH = \int_{t_1}^{t_2} [T(t) - T_{sp,b}]^+ dt$	T: Temperatura do ar interior (°C) T _{sp,b} : Limite de resfriamento (°C) t: tempo (horas)	
Horas de excedência (He)	$He = \text{Top} > T_{max}$	Top: Temperatura operativa (°C) T _{max} : Temperatura máxima definida como o limite superior do modelo de conforto adaptativo da EN 15.251 (EN, 2007) (°C)	
Excesso Ponderado Diário (We)	$We = \sum He \times wf$	He: Horas excedidas (horas) wf: Fator de ponderação. wf = 0 se Top < T _{max} , caso contrário wf = Top - T _{max}	
Grau de superaquecimento interno (IOD)	$IOD = \frac{\sum [T_{in,o,z,i} - T_{comf,f,z,i}]^+ \times t_{i,z}}{\sum t_{i,z}}$	T _{in,o,z,i} : Temperatura operativa da zona (°C) T _{comf,f,z,i} : Limite de conforto térmico, definido conforme o método de conforto adaptativo (°C) t _{i,z} : tempo (horas)	
Temperatura efetiva padrão (SET)	Severidade (SEV)	$SEV_{total} = \sum s (SET_N + SET_D)$ $SEV_{N \text{ ou } D} = \sum n (SET_t + SET_{Ln \text{ ou } Ld})$	SEV _{total} : Severidade total de um evento de superaquecimento interno (°C.h) SEV _{N ou D} : Severidade de um evento de superaquecimento interno durante a exposição noturno e/ou diurna (°C.h) SET _{Ln ou Ld} : Temperatura de SET limite para um ocupante durante exposição noturna e/ou diurna (°C) SET _t : Valor horário de SET durante a exposição diurna e noturna (°C)
	Intensidade (In)	$I_{N \text{ ou } D} = \frac{SEV_s}{P_t}$	I _{N ou D} : Intensidade de um evento de superaquecimento interno durante a exposição noturno e/ou diurna (°C) P _t : Período de exposição diurna e noturna (horas)
Índice de calor (IC)	$HI = (-8.78469475556) + (1.161139411 \times Ta) + (2.33854886889 \times R) + (0.14611605 Ta \times R) + (-0.012308094 \times Ta^2) + (-0.016424827778 \times R^2) + (0.002211732 Ta^2 \times R) + (0.00072546 \times Ta \times R^2) + (-0.000003582 \times Ta^2 \times R^2)$	Ta: Temperatura do ar interna (°C) R: Umidade relativa do ar interno (%)	

Fonte: a autora (2023)

A Temperatura Efetiva Padrão (SET) é definida como a temperatura do ar equivalente de um ambiente de referência que provoca a mesma perda total de calor da pele ou estresse térmico que as condições reais do ambiente (Du e Yang, 2020). Além disso, essa métrica considera quatro variáveis ambientais internas (temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do vento) e duas variáveis humanas (vestimentas e taxa metabólica), respondendo às condições térmicas dos ocupantes em um ambiente térmico, podendo ser utilizado como um indicador de vulnerabilidade dos ocupantes (Ji et al., 2022). Assim, o método avalia tanto a severidade quanto a intensidade do evento de superaquecimento nos ambientes durante os períodos

diurnos e noturnos, visando identificar os riscos para os ocupantes (Laouadi, Bartko e Lacasse, 2020).

Contudo, a maioria das métricas se baseia nos limites de conforto adaptativo propostos pela ASHRAE Standard Standard 55 (2020). Os modelos adaptativos mais difundidos para edifícios naturalmente ventilados são os desenvolvidos por Nicol e Humphreys (Nicol, Humphreys e Roaf, 2012; Nicol e Humphreys, 2010 e Nicol e Humphreys, 2002), Auliciems (1981) e De Dear e Brager (1998) (Tabela 9). Esses modelos se apoiam em regressões lineares que associam as temperaturas operativas internas às temperaturas médias do ar externo, ou seja, as temperaturas neutras e/ou conforto variam conforme as condições climáticas externas. Assim, temperaturas externas mais elevadas permitem temperaturas internas mais altas, o que se acentua quando se consideram os impactos das mudanças climáticas.

Tabela 9 – Demonstração das equações dos modelos de conforto adaptativo

Modelo Adaptativo	Condição do ambiente	Equação	Legenda
Nicol e Humphreys (1973)	Naturalmente ventilados	$T_n = 11,9 + 0,534T_o$	<i>T_n</i> : temperatura operativa interna neutra ou preferida (°C) <i>T_o</i> : temperatura do ar média mensal externa (°C)
Auliciems (1981)	Naturalmente ventilados	$T_n = 17,7 + 0,27T_o$	<i>T_n</i> : temperatura operativa interna neutra ou preferida (°C) <i>T_o</i> : temperatura do ar média mensal externa (°C)
De Dear e Brager (1998) adotado pela ASHRAE Standard 55 (2020) e NBR 16.401 (ABNT, 2021)	Naturalmente ventilados	$T_n = 17,8 + 0,31T_o$	<i>T_n</i> : temperatura operativa interna neutra ou preferida (°C) <i>T_o</i> : temperatura do ar média mensal externa (°C)
Humphreys, Rijal e Nicol (2013)	Naturalmente ventilados	$T_n = 13,8 + 0,53T_o$	<i>T_n</i> : temperatura operativa interna neutra ou preferida (°C) <i>T_o</i> : temperatura do ar externo predominante (°C)

Fonte: a autora (2023)

Contudo, é perceptível que os modelos de conforto adaptativo têm particularidades, uma vez que são aplicáveis apenas a edifícios naturalmente ventilados. Em outras palavras, a temperatura neutra é estabelecida a partir de um valor representativo da temperatura externa. Além disso, as equações mostram notável similaridade e fornecem suporte mútuo, estabelecendo uma relação significativa entre as temperaturas internas e externas em edifícios naturalmente ventilados. Entretanto, a principal limitação desse método é a faixa de aplicação, na qual a temperatura média predominante deve ser inferior a 33,5°C. Contudo, com as projeções de mudanças climáticas, as temperaturas médias externas tendem a ultrapassar esse limite.

Ademais, sabe-se que exposições prolongadas a altas temperaturas e umidade relativa do ar podem ter efeitos adversos na saúde humana, podendo até levar à morte em situações extremas. Taylor et al. (2023) destacam que, embora os modelos de conforto adaptativo se baseiem na temperatura operativa, outros fatores ambientais como a velocidade do ar, a umidade relativa e a temperatura radiante são fisiologicamente mais relevantes para avaliar os ocupantes em relação ao superaquecimento interno das edificações. Portanto, é fundamental considerar o efeito da umidade relativa do ar na avaliação das condições internas das edificações, principalmente, em tempos de mudanças climáticas.

No Brasil, a avaliação das condições internas das edificações, considerando as mudanças climáticas e os riscos aos ocupantes, ainda é pouco explorada. No entanto, tem sido quantificada com base nos limites de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020), conforme evidenciado pelos trabalhos de Alves, Gonçalves e Duarte (2021); Guarda et al. (2020); Triana, Lamberts e Sassi (2018); Alves, Duarte e Gonçalves (2016) e Invidiata e Ghisi (2016). Além disso, não existem normas e métricas específicas para o superaquecimento interno de edificações residenciais no Brasil.

Neste contexto, a NBR 15.575 (ABNT, 2021) busca avaliar o desempenho térmico das habitações, tanto em condições naturalmente ventiladas como em condições artificialmente condicionadas. Essa avaliação é feita em três níveis: mínimo, intermediário e superior, com opção de método simplificado e/ou simulação computacional. O método simplificado consiste na comparação dos sistemas de vedação vertical interna e externa, da cobertura e das aberturas em relação aos valores de referência estabelecidos pela NBR 15.575, em termos de transmitância térmica, capacidade térmica, abertura para ventilação e percentual de elementos transparentes (ABNT, 2021).

O método de simulação computacional, por sua vez, é uma ferramenta mais próxima da quantificação do superaquecimento de edificações, uma vez que avalia o Percentual de Horas de Ocupação da Habitação em uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT_{UH}) com três intervalos: de 18°C a 26°C, até 28°C e até 30°C, além da Temperatura Operativa Anual Máxima (Tomáx_{UH}) da habitação. Além disso, existe a NBR 16.401 (ABNT, 2021), que estabelece as condições térmicas aceitáveis para adultos saudáveis em ambientes internos naturalmente ventilados e controlados pelos usuários. Contudo, essa norma se baseia no método da ASHRAE Standard 55 (2020).

Porém, é importante destacar que essas normativas brasileiras, como a NBR 15.575 e a NBR 16.401, apesar de oferecerem orientações sobre desempenho térmico e condições internas aceitáveis, ainda não abordam de maneira específica o superaquecimento interno das edificações residenciais e suas implicações no contexto das mudanças climáticas. Esse aspecto pode se tornar crucial para futuras atualizações das normas. Nesse sentido, é fundamental considerar uma métrica que contemple variáveis ambientais e fisiológicas, a fim de quantificar os riscos de vulnerabilidade ao calor dos ocupantes internos das edificações e a intensidade do evento de superaquecimento.

2.3.3 Índices para avaliação das condições internas das edificações considerando as respostas fisiológicas dos ocupantes

A maioria dos modelos contemporâneos de conforto térmico considera, em seus métodos, apenas o efeito da temperatura do ar externa e operativa interna até certo ponto, utilizando limiares predefinidos, muitas vezes pela temperatura neutra, como os modelos adaptativos. Laodi, Bartko e Lacasse (2020) mencionam que outros fatores relevantes para conforto térmico não são considerados, tais como a umidade relativa, velocidade do ar, nível de atividade (incluindo durante o sono) e vestimentas dos ocupantes, que podem variar, ao longo do dia ou em intervalos temporais (diurnos e noturnos). No entanto, esses elementos estão incorporados nos índices de conforto térmico estático, como o Voto Médio Estimado (PMV), e nos transitórios, como a Temperatura Efetiva Padrão (SET).

O PMV é baseado na equação do balanço de calor em condições próximas à neutralidade e prevê respostas de conforto em estado estático. No modelo, a temperatura da pele e a taxa de sudorese foram obtidas por meio de experimentos, em uma câmara climática, e são função da taxa metabólica (Fanger, 1970). Além disso, é um dos índices de avaliação mais populares aplicados em ambientes térmicos internos, empregando uma escala de sete pontos para capturar a resposta térmica média do corpo humano (Fanger, 1970). O PMV depende de seis variáveis, sendo duas pessoais, como a taxa metabólica e as vestimentas, e quatro ambientais, como a temperatura do ar interno, a temperatura radiante média, a velocidade do ar e a umidade relativa. O método deste índice é apresentado na ASHRAE Standard 55 (2020) para a avaliação de conforto térmico em ambientes internos.

Nicol (2004) sugere que, em edifícios naturalmente ventilados, o modelo PMV pode superestimar as sensações térmicas em ambientes quentes e subestimar em ambientes frios, em função do comportamento adaptativo dos ocupantes. Kim et al. (2015) verificaram diferenças

significativas entre a sensação térmica estimada pelo PMV e a sensação real dos ocupantes. Essa discrepância também foi destacada por Fan, Liu e Wargocki (2019), Fang et al. (2019) e Liu et al. (2018). Diante disso, Zhang e Lin (2020) propuseram um método reverso para incorporar a influência da adaptação humana na taxa metabólica ao modelo PMV. Azizpour et al. (2013) observaram que o PMV superestima a sensação térmica real em testes realizados em regiões tropicais, aplicando uma correção ao ponto neutro do modelo de +0,7. Schweiker e Wagner (2015) propuseram um modelo adaptativo de balanço térmico, que combina o método adaptativo de conforto com o modelo existente, considerando fatores como cultura, clima, sociedade e adaptação psicológica e comportamental do ocupante.

O SET, comparado ao PMV, é mais avançado por duas razões: i) pode ser aplicado a condições dinâmicas, enquanto o PMV é voltado para respostas de conforto estáticas, e ii) incorpora previsões de temperatura e umidade da pele (Fang et al., 2021). Além disso, o SET é amplamente usado para avaliar ambientes internos de edifícios com diversos usos, considerando atividades dos ocupantes e vestimentas conforme os períodos de ocupação (Laouadi, Bartko e Lacasse, 2020; Ji et al., 2022; Fang et al., 2021).

O índice é desenvolvido com base em um modelo dinâmico de dois nós para a regulação da temperatura corporal humana, proposto por Gagge, Stolwijk e Nishi (1971) e Gagge, Fobelets e Berglund (1986), apresentado no *Chapter 8 da ASHRAE handbook of fundamentals - Thermal Comfort, Physiological Principles and Health* (1989 e 1997). O modelo compreende dois sistemas: i) o passivo, que lida com os diversos mecanismos de troca de calor entre o corpo humano e o meio ambiente, e ii) termorregulador, que aborda mecanismos fisiológicos, como sudorese, vasodilatação, vasoconstrição e tremores (Ye et al., 2003; Ji et al., 2021). Em suma, a modelagem captura a resposta fisiológica do corpo humano quando exposto a condições térmicas estressantes. O procedimento de cálculo do modelo de dois nós, proposto por Gagge, Stolwijk e Nishi (1971) e Gagge, Fobelets e Berglund (1986), é detalhado na ASHRAE (1989 e 1997), bem como nas pesquisas de Ji et al., (2022 e 2021), Du e Yang (2020) e Itani et al. (2020).

O SET é definido como a temperatura do ar equivalente de um ambiente de referência que produz a mesma perda total de calor da pele, em condições reais (Laouadi, Bartko e Lacasse, 2020). Esse ambiente de referência é isotérmico, com umidade relativa do ar = 50%, temperatura radiante média igual à temperatura do ar, velocidade do ar = < 0,1m/s (ar parado), taxa metabólica = 1,0Met e roupas padronizadas de 0,67clo (Gagge, Fobelets e Berglund, 1986). No entanto, para simplificar o cálculo do SET, é possível utilizar ferramentas como o pacote *pythermalcomfort* do Python

(Tartarini et al., 2019), o pacote de código aberto (*comfR*) do Rstudio (Schweiker, 2022) ou a ferramenta *CBE Thermal Comfort Tool* disponibilizada pela Universidade de Berkeley (Tartarini et al., 2020).

Gao, Wang e Wargocki (2015) realizaram uma análise comparativa da sensação térmica humana estimada pelo modelo de PVM e pelo SET em edifícios ventilados naturalmente, constatando que o SET possui maior precisão da sensação térmica humana. Fang et al. (2019) validaram índices de conforto térmico por meio de questionários subjetivos e medições de campo em um campus universitário na China, evidenciando relações significativas entre a temperatura operativa e o SET. Jiang et al. (2018) investigaram mudanças dinâmicas na taxa metabólica e seus impactos no conforto térmico, concluindo que o SET é eficaz em prever a sensação térmica sob altas taxas metabólicas.

Laouadi, Bartko e Lacasse (2020) afirmam que o uso do SET pode ser efetivo para analisar as respostas fisiológicas dos ocupantes em ambientes quentes, principalmente durante ondas de calor. Itani et al. (2020) e Ji et al. (2023) apontam que o SET pode ser um indicador do desempenho térmico, principalmente, para avaliar a vulnerabilidade dos ocupantes.

Além disso, ao considerar a vulnerabilidade dos ocupantes, um dos critérios para adotar o SET como indicador é que seus limites devem refletir sensações térmicas e englobar faixas mais amplas que os limites de desconforto térmico dos modelos adaptativos, a fim de representar com precisão os riscos do ambiente térmico à saúde humana. Laouadi, Bartko e Lacasse (2020) relatam que as faixas de estresse térmico devem evidenciar que a transpiração excessiva pode levar a problemas de saúde, como exaustão em decorrência do calor e desidratação, que não podem ser aliviados por medidas simples de adaptação, como troca de roupa, redução do nível de atividade, abertura de janelas, entre outras ações.

Meinke et al. (2017) afirmam que, para ocupantes não aclimatados, o limite superior para o SET é de 29,3°C. Acima disso, os ocupantes começam a se sentir desconfortavelmente quentes e adotam medidas como abrir janelas para restaurar o conforto térmico. Parson (2014) relata que 30,0°C representa uma faixa levemente quente para ocupantes saudáveis e não aclimatados, enquanto 31,2°C é considerado para ocupantes aclimatados. Zhang et al. (2018) indicam que um valor de SET de 31,1°C para ocupantes aclimatados em áreas rurais se traduz em uma sensação de ligeiramente quente, equivalente a um PMV de 1,0. Laouadi, Bartko e Lacasse (2020) mencionam que o limite superior da faixa de conforto, considerando SET, é de 26°C para ocupantes não aclimatados e de 27,2°C para ocupantes aclimatados.

Itani et al. (2020) constatam que a sensação térmica em idosos saudáveis entre 65 e 70 anos, é mais afetada em comparação com adultos mais jovens sob exposição ao calor, mas menos afetada sob exposição ao frio. Esses resultados corroboram com a ASHRAE Standard 55 (2020), que enfatiza que indivíduos mais sensíveis demandam de uma faixa de conforto térmico mais estreita, com 90% de aceitabilidade. Assim, os valores limites sugeridos de SET para idosos são 30,0°C para não aclimatados e de 31,2°C para aclimatados (Itani et al., 2020).

Lomas e Porritt (2017) relatam que, durante a noite e o sono dos ocupantes dormindo, a qualidade do sono prevalece sobre o conforto térmico. Lan et al. (2017) argumentam que a demanda por conforto térmico em ambientes de sono é mais alta em comparação com os ambientes de trabalho. Dongmei et al. (2012) observam que ocupantes dormindo cobertos e em camas preferem uma faixa de temperatura entre 20,0°C e 25,0°C, enquanto sem cobertores e usando roupas leves a faixa de temperatura é de 29,0°C a 32,0°C. Imagawa e Rijal (2015) identificam a temperatura confortável para dormir entre 26,3°C e 27,1°C em residências naturalmente ventiladas em climas quentes e úmidos. Wang et al. (2015) estabelecem a faixa de SET confortável para dormir entre 26,0°C e 31,0°C em condições de inverno, com ocupantes cobertos e vestindo cerca de 3,55clo de roupas. Zhu et al. (2016) verificam uma faixa confortável de SET para sono entre 29,1°C e 29,7°C. Essas pesquisas são resumidas na Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo dos valores limites de SET definidos pelos estudos acima

Autor	Local de realização do estudo	Ocupante	Atividade	Valor limite de SET
Meinke et al. (2017)	Alemanha	Ocupantes não aclimatados	Sentados	29,3°C
Parson (2014)	Ambiente controlado (laboratório)	Ocupantes saudáveis e não aclimatados	Atividade leve	30,0°C
		Ocupantes aclimatados		31,2°C
Zhang et al. (2018)	China	Ocupantes aclimatados	Sentados	31,1°C
Laouadi, Bartko e Lacasse (2020)	Canadá	Ocupantes não aclimatados	Andando	26,0°C
		Ocupantes aclimatados		27,2°C
Itani et al. (2020)	Ambiente controlado (exposição às condições quentes e secas ou úmidas)	Idosos saudáveis não aclimatados	Sentados	30,0°C
		Idosos saudáveis aclimatados		31,2°C
Wang, et al. (2015)	Ambiente controlado	Ocupantes cobertos	Dormindo	30,0°C
Zhu et al. (2016)	Pequim	Ocupantes dormindo	Dormindo	29,7°C

Fonte: a autora (2023)

No âmbito dos estudos apresentados, percebe-se que o limite para SET está em torno de 30,0°C. Ao ultrapassar esse valor, os ocupantes podem apresentar estresse térmico, em função de elevadas temperaturas internas do ambiente. No entanto, para avaliar a vulnerabilidade dos ocupantes no interior das edificações, é importante considerar a sensação térmica, principalmente, levando em conta o estado fisiológico, a fim de estimar os riscos à saúde decorrentes do

superaquecimento interno. Neste contexto, Parsons (2014) propõe uma escala quantitativa de sensação térmica associada ao índice SET, correlacionando-se com o estado fisiológico do ser humano após inúmeras investigações por meio de experimentos em ambientes controlados (Tabela 11).

Tabela 11 – Escala quantitativa de sensação térmica do índice SET

Escala de SET (°C)	Sensação térmica (ST)	Estado fisiológico
≥ 37,5	Muito quente, estresse térmico	Falha na termorregulação
≥ 34,5 ST < 37,5	Quente, muito inaceitável	Sudorese profunda
≥ 30,0 ST < 34,5	Quente, desconfortável, inaceitável	Transpiração
≥ 25,6 ST < 30,0	Ligeiramente quente, ligeiramente inaceitável	Sudorese ligeira, vasodilatação
≥ 22,2 ST < 25,6	Confortável e aceitável	Neutralidade térmica
≥ 17,5 ST < 22,2	Ligeiramente fresco, ligeiramente inaceitável	Vasoconstrição
≥ 14,5 ST < 17,5	Frio e inaceitável	Resfriamento lento do corpo
≥ 10,0 ST < 14,5	Frio, muito inaceitável	Tremendo

Fonte: adaptado de Parsons (2014)

Dessa maneira, observa-se que Parsons (2014) define o estado de neutralidade térmica com temperaturas efetivas padrão até 25,6°C. Quando a temperatura excede a 37,5°C, o autor considera uma falha na termorregulação e o ocupante está sujeito ao estresse térmico, aumentando os riscos à vida. Isso também se aplica às condições de frio. Com base na escala de sete pontos da ASHRAE Standard 55 (2020), Ji et al. (2023) correlacionam o índice SET com sensação térmica, estabelecendo os seguintes patamares: “neutro” a 24,12°C, “alerta” a 28,12°C e emergência a 32,12°C, correspondendo a conforto térmico, início de transpiração e situação de risco, respectivamente. Assim, os autores categorizam em três níveis: habitável, alerta térmico e emergência (risco de vida).

Itani et al. (2020), baseando-se na escala proposta por Parsons (2014), identificam três níveis: i) neutralidade térmica (conforto), com SET de 26,0°C, que protege os ocupantes, mesmo doentes, da mortalidade e possibilita a adaptação no interior das edificações; ii) condições ligeiramente quentes (ligeira transpiração), com SET de 30,0°C, que ainda protege os ocupantes capazes de se adaptarem e não doentes, permitindo a restauração do conforto térmico por meio de ações como aumento da ventilação, redução de vestimentas, entre outras; e iii) condições muito quentes (sudorese excessiva), com SET de 35,0°C, representando um ambiente hostil e inaceitável para a sobrevivência humana. Os autores enfatizam que, quanto maior o tempo de exposição em cada nível, mais difícil será a recuperação e maior será a exposição aos riscos.

Tavakoli et al. (2022) reforçam a necessidade de utilizar índices que relacionem o estresse térmico com o estado fisiológico para avaliar a vulnerabilidade dos ocupantes em edificações. Esses índices ajudam a quantificar os riscos à saúde humana, como a exaustão pelo calor e potenciais fatalidades. Ji, Zhu e Cao (2020) destacam que o modelo SET não apenas incorpora os efeitos combinados de quatro variáveis ambientais com duas pessoais, mas também supera as limitações do PMV, resultando em cálculos de balanço de calor mais precisos. Ye et al. (2003) avaliam o SET como um indicador de estresse térmico e concluem que é mais consistente em comparação com o PMV.

Considerando esses limiares e os riscos decorrentes do superaquecimento, torna-se crucial avaliar as condições de conforto térmico com índices, que conectem a sensação térmica com o estado fisiológico. Isso se torna principalmente importante à medida que as mudanças climáticas ocorrem, exigindo a consideração de parâmetros como a umidade nas avaliações. Nesse contexto, o SET se destaca como um índice promissor para estimar a vulnerabilidade de ocupantes em edificações residenciais.

Por fim, nota-se que os estudos apresentados utilizam o SET como indicador nas avaliações das condições internas dos edifícios e concluem que esse índice possui aplicabilidade na quantificação da sensação térmica humana. Portanto, o SET demonstra ser um índice promissor para avaliar a vulnerabilidade de ocupantes em edificações residenciais diante das condições térmicas.

2.4 ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS: UM OLHAR PARA A APLICAÇÃO DE MEDIDAS PASSIVAS EM PERÍODOS DE SUPERAQUECIMENTO

Os impactos das mudanças climáticas estão conduzindo ao aumento na severidade e frequência dos eventos de ondas de calor e superaquecimento interno em edifícios. Esse cenário é, principalmente, observado em edifícios situados em áreas urbanas, distritos e megacidades, nos riscos de superaquecimento está aumentando. Como resultado, é previsto que as condições internas de edificações residenciais possam piorar no futuro, elevando o risco de estresse térmico e até mesmo mortes relacionadas ao calor entre os ocupantes (Schunemann, Son e Ortlepp, 2022; Manoli et al., 2019).

Assim, a adaptação das edificações assume um papel crucial para mitigar a vulnerabilidade dos ocupantes. Cui et al. (2022) enfatizam que, no Reino Unido, a adaptação das edificações para enfrentar a vulnerabilidade ao calor se tornou uma prioridade frente às mudanças climáticas. Além

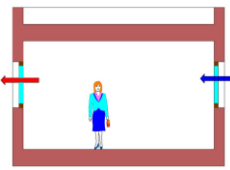

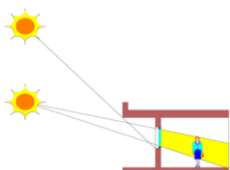
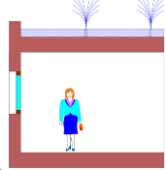
disso, à pandemia em 2019 (COVID-19) tem levado as pessoas a passarem mais tempo em suas residências, adotando o home office como rotina. Isso, por sua vez, intensifica os riscos de superaquecimento interno, sujeitando os ocupantes a ameaças à saúde e à produtividade, principalmente, durante episódios de ondas de calor e altas temperaturas (Ambrose et al., 2021; Awada et al., 2021).

O IPCC (2022) conceitua a adaptação como “um processo de ajuste ao clima real ou futuro e seus impactos, de modo a moderar danos ou explorar oportunidades benéficas”. Essas ações visam garantir a segurança da população, principalmente em resposta aos impactos das mudanças climáticas. Nesse contexto, destaca-se que a adaptação consiste em um conjunto de estratégias e medidas disponíveis, sendo apropriadas para reduzir a vulnerabilidade climática. Essas ações podem ser de natureza estrutural, ecológica e comportamental (IPCC, 2022). Portanto, a adaptação das edificações pode desempenhar um papel importante na redução da vulnerabilidade dos ocupantes às altas temperaturas no interior das edificações.

Um aspecto fundamental da adaptação é que seja de caráter passivo e bioclimático, isto é, aquelas que relacionam as condições climáticas com a arquitetura e favorecem estratégias independentes de energia elétrica. Segundo Zhang et al. (2021), a adaptação deve ser entendida como a capacidade do sistema de se ajustar e se reconfigurar em situações extremas, como as mudanças climáticas, visando aumentar sua resiliência. O autor ilustra exemplos de adaptação em edificações, como a utilização de sombreamento controlado e brises, que podem ser acionados quando a temperatura interna do edifício se eleva devido à radiação solar.

Ming et al. (2023) afirmam que, para lidar com ondas de calor mais frequentes e intensas provenientes das mudanças climáticas, é fundamental incorporar estratégias passivas em edificações residenciais novas e existentes, preparando-as para impactos térmicos sem aumentar o consumo de energia. Manzano-Agugliaro et al. (2015) detalham estratégias bioclimáticas mais eficazes na busca pelo conforto térmico, delineando suas aplicações e viabilidade (Tabela 12).

Tabela 12 - Estratégias bioclimáticas, seus limites de aplicação e possíveis estratégias

Estratégias	Limite Inferior	Limite Superior	Medidas
Ventilação	20,0°C	32,0°C	Dimensões das aberturas 
Massa Térmica para Resfriamento	20,0°C	35,0°C	Envoltória com alta capacidade térmica 
Sombreamento	20,0°C	-	Brises e venezianas nas aberturas 
Resfriamento Evaporativo	20,0°C	40,5°C	Telhados verdes e pulverização d'água na cobertura 

Fonte: adaptado de Manzano-Agugliaro et al. (2015)

No entanto, é importante destacar que algumas estratégias tradicionais em edificações, como ventilação e sombreamento, apresentam limites superiores de aplicação bem abaixo das temperaturas máximas atuais e previstas para as próximas décadas em diversas regiões e climas no Brasil.

Portanto, com as mudanças climáticas, tais estratégias tradicionais podem não ser eficazes o suficiente para lidar com esses impactos, comprometendo o desempenho térmico de edificações tanto atuais quanto futuras. Nesse contexto, uma síntese de pesquisas sobre estratégias bioclimáticas e medidas de projeto passivas comuns é apresentada, a fim de proporcionar uma visão abrangente da eficácia de suas implementações em edificações residenciais, considerando os efeitos das mudanças climáticas.

Borghero et al. (2023) analisaram a resiliência térmica de um edifício residencial em Barcelona durante períodos de superaquecimento, otimizando três estratégias de resfriamento passivo para diferentes cenários: o período histórico, 2030 e 2050, levando em conta o cenário de emissão RCP4.5. Os autores otimizaram as três estratégias da seguinte maneira: ventilação natural (abertura de janelas quando a temperatura interna ultrapassa 24,5°C); ventilação natural combinada

com a instalação de persianas com fração opaca de 70%; ventilação natural em conjunto com persianas e ventiladores de teto com velocidade superior a 1m/s. Os resultados evidenciaram que as estratégias de ventilação podem assegurar um nível satisfatório de conforto térmico em períodos atuais. Entretanto, diante das mudanças climáticas, essas mesmas estratégias demonstraram menor eficácia, em função das altas temperaturas externas. Adicionalmente, destaca-se que o aumento da ventilação por meio de ventiladores de teto não exerceu um impacto substancial nas condições internas do edifício.

Calama-González, León-Rodríguez e Suárez (2022) avaliaram o conforto térmico em edificações residenciais na Espanha, considerando o cenário de emissões A2 para os períodos de 2030, 2050 e 2080, e implementaram as estratégias de ventilação natural e sombreamento (por persianas). Os autores destacam que, nas orientações leste, oeste e norte, em todos os períodos analisados, as temperaturas médias internas variaram de 15,0°C a 20,0°C, enquanto na orientação sul, essas temperaturas variaram de 20,0°C a 25,0°C. O aumento da taxa de ventilação natural resultou em melhores condições internas, com uma melhoria de aproximadamente 5% a 10% até o final do século. Por outro lado, a implementação de sombreamento resultou em um incremento nas horas de conforto térmico nos cenários futuros.

Pajek, Potocnik e Kosir (2022) identificaram as medidas de projeto necessárias para cinco cidades europeias, levando em consideração o cenário de emissão A2 para os períodos de 2020, 2050 e 2080. Os autores utilizaram a ferramenta BcChart para elaborar as estratégias, a qual compreende três opções bioclimáticas: ventilação natural + alta inércia, ventilação natural, sombreamento e aquecimento solar passivo. Os autores destacam que a estratégia de aquecimento diminuirá gradualmente com o tempo, passando de 31% para 9% em relação ao período histórico até 2080. Entretanto, a necessidade de sombreamento aumentará em 81 dias para Porto e 72 dias em Milão.

Liu et al. (2020) identificaram as estratégias bioclimáticas recomendadas para Hong Kong, considerando os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos de 2035, 2065 e 2090, utilizando da carta bioclimática de Givoni. Os autores analisaram estratégias com ventilação natural, desumidificação, ar-condicionado e sombreamento, todas comuns em climas subtropicais. Com o aumento das temperaturas internas e da umidade, em função de alterações climáticas, o número de horas de desconforto térmico devido ao calor requer a aplicação de estratégias como desumidificação, totalizando cerca de 4.106 horas no cenário RCP8.5 em 2090, com temperaturas internas em torno de 30,5°C. A estratégia de sombreamento também aumentou no número de horas,

passando de 8.011 horas no período histórico para 8.505 horas no cenário RCP8.5 em 2090. Contudo, a utilização da ventilação natural apresentou uma redução significativa, diminuindo de 2.019 horas no período histórico para 990 horas no cenário RCP8.5 em 2090. Os autores ressaltam que um aumento na taxa de ventilação para 1,0m/s é capaz de reduzir as horas de desconforto térmico dos ocupantes.

Roshan, Oji e Sombreado (2019) avaliaram o impacto das mudanças climáticas nas estratégias bioclimáticas para dez cidades no Irã, considerando os cenários de emissões RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 para os períodos de 2020 e 2050. Os autores consideraram dezesseis estratégias agrupadas em aquecimento solar, umidificação, ventilação natural, sombreamento e resfriamento evaporativo. Os resultados indicam que as estratégias de aquecimento e resfriamento evaporativo não são necessárias nos três cenários de emissões.

No entanto, a combinação de resfriamento evaporativo, alta inércia térmica e ventilação noturna foi a mais recomendada para os cenários climáticos futuros. Além disso, os autores enfatizam que, em decorrência de às altas temperaturas e baixa umidade relativa durante a maior parte do ano, a estratégia de resfriamento ativo foi a mais recomendada.

Nesse panorama, observa-se que as estratégias bioclimáticas enfrentarão desafios sob os impactos do aquecimento global, refletindo na redução da eficácia da ventilação natural e no aumento do sombreamento, o que pode ser justificado pelo aumento das temperaturas externas. Assim, a adaptação climática das edificações se torna relevante, a fim de manter as condições internas em níveis aceitáveis, principalmente, por meio da utilização de estratégias bioclimáticas e/ou passivas. A Tabela 13 apresenta as pesquisas que se concentram na investigação de estratégias bioclimáticas de caráter passivo.

Tabela 13 – Resumo das pesquisas que investigaram as estratégias bioclimáticas de caráter passivo

Autor	País	Cenário	Período	Estratégias	Principais resultados
Borghero et al. (2023)	Barcelona	RCP4.5	2030 2050	Ventilação natural	Estratégias de ventilação podem garantir um bom nível de conforto durante o período atual, no entanto, considerando os impactos das mudanças climáticas as estratégias são menos eficazes.
				Ventilação natural + implementação de persianas	
				Ventilação natural + persianas + ventiladores de teto	
Calama-González, León-Rodríguez e Suárez (2022)	Espanha	A2	2030 2050 2080	Ventilação natural	Com o aumento da taxa de ventilação natural, levou a melhores condições internas em torno de 5% a 10% até o final do século, entretanto com a aplicação do sombreamento as horas de conforto térmico aumentaram nos cenários futuros.
				Sombreamento (por persianas)	
				Orientações solar	
Pajek, Potocnik e Kosir (2022)	Europa	A2	2020 2050 2080	Ventilação natural + alta inércia	A estratégia de aquecimento reduzirá gradativamente ao longo do tempo de 31% passando para 9% do período histórico até 2080, no entanto, os dias com a necessidade de sombreamento aumentará em 81 dias para Porto e 72 dias em Milão.
				Ventilação natural	
				Sombreamento	
				Aquecimento solar passivo	
Liu et al. (2020)	Hong Kong	RCP4.5 RCP8.5	2035 2065 2090	Ventilação natural	A estratégia de sombreamento também apresenta aumento nas horas sendo de 8.011 no período histórico passando para 8.505 horas no RCP8.5 em 2090. A utilização da ventilação natural reduz significante, sendo de 2.019 horas no período histórico passando para 990 horas no RCP8.5 em 2090.
				Desumidificação	
				Ar-condicionado	
				Sombreamento	
Roshan, Oji e Sombreado (2019)	Irã	RCP4.5 RCP6.0 RCP8.5	2020 2050	Aquecimento solar passivo	As estratégias de aquecimento e de resfriamento evaporativo não são necessárias nos três cenários de emissões. A estratégia de resfriamento evaporativo + alta inércia térmica + ventilação noturna foi a mais recomendada em cenários climáticos futuros.
				Umificação	
				Ventilação natural	
				Sombreamento	
				Resfriamento evaporativo	

Fonte: a autora (2023)

Neste contexto, pesquisas têm investigado da aplicação de medidas tecnológicas que envolvem a alteração dos parâmetros físicos das edificações. Essas medidas abrangem desde o aumento ou redução da capacidade e transmitância térmica das paredes e cobertura, através da substituição de materiais, até modificações no tipo de vidros, como a adoção de vidros para duplos

e triplos, e a implementação de estratégias como telhados frios e a adição de isolamento térmico nas paredes e coberturas, entre outras medidas.

Rahif, Mostafa e Sombreado (2023) avaliaram o risco de superaquecimento em um edifício residencial de alto desempenho na Bélgica. Os autores otimizaram nove medidas de adaptação considerando o cenário de emissão SSP2-4.5 do AR6 para o período histórico, 2050 e 2080. As estratégias foram otimizadas em intervalos, abrangendo taxa de ventilação natural, orientação solar, absorvância das paredes externas e da cobertura, taxa de infiltração, sombreamento, tipos de vidros, molduras de janelas e variações de transmitância térmica das paredes externas e internas, cobertura e piso.

Dessa forma, os autores concluem que a adoção de uma alta taxa de ventilação, baixa taxa de infiltração, isolamento e massa térmica elevados, telhado verde e a inserção de persianas nas janelas resultam em um aumento de até 46% das horas anuais de conforto térmico e uma melhoria de até 32% na eficiência energética. No entanto, algumas estratégias, como a orientação solar e absorvância da cobertura, não contribuem para a melhoria das condições internas diante do cenário de aquecimento. Vale ressaltar que, mesmo com tais otimizações, o risco de superaquecimento em edifícios, considerando o impacto das mudanças climáticas, pode atingir níveis críticos e prejudiciais à saúde dos ocupantes.

Bamdad (2023) se concentrou na avaliação de uma edificação residencial na Austrália, explorando a variação de dois tipos de telhados com diferentes refletividades solares de 0,25 e 0,90. O autor utilizou o modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2020) como método para avaliar o conforto térmico, considerando os cenários de emissões RCP4.5 e RCP 8.5 para projeções futuras, abrangendo os anos de 2030, 2050, 2070 e 2090. Os resultados demonstraram que telhados com refletância de 0,9 são capazes de reduzir a demanda de resfriamento em até 14%, contribuindo para a melhoria das condições internas. No entanto, o autor alertou sobre a necessidade de avaliar minuciosamente a aplicação de telhados frios em climas temperados em função do potencial de causar desconforto térmico aos ocupantes.

Furton, Szagri e Nagy (2022) avaliaram as condições internas e o conforto térmico de um edifício de alto desempenho na Lituânia. Para isso, empregaram o PMV como métrica de conforto térmico e o UDH como métrica de superaquecimento, estabelecendo uma temperatura limite de 26,0°C. O estudo considerou o cenário de emissão RCP4.5 para os períodos de 2050 e 2080. Os autores investigaram três tipos de vidros, sendo: o simples, duplos e triplos, com a adição de sombreamento nas janelas. Neste contexto, os vidros triplos mostraram um desempenho superior

em comparação com os outros tipos, resultando em uma redução de 7,6% das horas de desconforto térmico em 2050 e 14,8% em 2080. Além disso, os autores destacaram que os vidros com maior capacidade de isolamento demonstraram eficácia em manter as condições internas em níveis aceitáveis diante de cenários de aquecimento.

Calama-González e León-Rodríguez (2022) avaliaram as horas de superaquecimento em habitações populares na Espanha. Para essa análise, adotaram o modelo adaptativo da EN 16.798 (2019) como métrica de avaliação de conforto térmico. O estudo considerou o cenário de emissão A2 para as projeções de 2030, 2050 e 2080. No intuito de aprimorar as condições internas, os autores aplicaram soluções passivas, considerando diferentes espessuras de lã de rocha e poliestireno extrudado para o telhado, bem como variando espessuras de telhado verde. Quanto às paredes, avaliaram nove espessuras de lã de rocha, duas de poliuretano e seis de poliestireno expandido. Para as janelas, foram testados cinco tipos de vidros e esquadrias distintas. Um aspecto relevante dos resultados foi a constatação de que edifícios adaptados podem reduzir em até 28% as horas de superaquecimento em 2080, em comparação com edifícios não adaptados. Além disso, a pesquisa identificou que o uso de isolamento interno nas paredes, com espessuras variando entre 0,04 a 0,06m, é mais eficaz quando combinado com janelas de vidro duplo e esquadrias de madeira e PVC.

Liu et al. (2020) avaliaram a aplicação de medidas passivas de projeto em um edifício multifamiliar de interesse social de 30 (trinta) andares em Hong Kong. O estudo considerou os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos de 2035, 2065 e 2090. Os autores otimizaram as medidas, variando em faixas, como a transmitância térmica dos vidros ($0,85\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ a $5,75\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), a relação de área de janela (10% a 70%), a transmitância térmica das paredes externas ($0,40\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ a $3,85\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) e a absorvância das paredes externas (0,10 a 0,58). Os autores destacam que a redução dos valores de transmitância térmica das janelas e das paredes resulta em uma diminuição de aproximadamente 5% no desconforto térmico nos ambientes internos, especialmente, no cenário RCP8.5 em 2090. No entanto, enfatizam que a absorvância das paredes é uma medida altamente sensível ao desempenho do edifício, e recomendam valores inferiores a 0,50. A Tabela 14 apresenta um resumo das pesquisas que têm como objetivo avaliar a implementação de medidas passivas de projeto em edificações residenciais.

Tabela 14 – Resumo das pesquisas que investigam as medidas passivas de projeto em edificações

Autor	País	Cenário	Período	Medidas	Principais resultados
Rahif, Mostafa e Sombreado (2023)	Bélgica	SSP2-4.5	2050 2080	Taxa de ventilação natural	Alta taxa de ventilação, baixa taxa de infiltração, alto isolamento e massa térmica, telhado verde e a inserção de persianas nas janelas aumentam o conforto térmico para até 46% das horas anuais e a eficiência energética em até 32%.
				Orientação solar	
				Absortância das paredes e cobertura	
				Transmitância das paredes e cobertura	
				Taxa de Infiltração Sombreamento	
Tipos de vidros e molduras das janelas					
Bamdad (2023)	Austrália	RCP4.5 RCP8.4	2030	Telhado com refletividade solar de 0,25	Os telhados com refletância de 0,9 pode reduzir a carga de resfriamento em até 14% e melhoram as condições internas.
			2050		
			2070	Telhado com refletividade solar de 0,90	
			2090		
Furton, Szagri e Nagy (2022)	Lituânia	RCP 4.5	2050	Vidros simples + sombreamento nas janelas	Os vidros triplos apresentaram melhores desempenho em relação aos demais tipos de vidros, com redução de 7,6% em 2050 e 14,8% em 2080 das horas em desconforto térmico.
			2080	Vidros duplo + sombreamento nas janelas	
				Vidros triplos (com enchimento de argônio) + sombreamento nas janelas	
Calama-González e León-Rodríguez (2022)	Espanha	A2	2030	Telhado: seis espessuras de lã de rocha, de poliestireno extrudado e seis espessuras de telhado verde	O uso de isolamento interno nas paredes (0,04 a 0,06m) é mais eficaz quando combinadas com janelas de vidro duplos e com esquadrias de madeira e PVC.
			2050	Paredes externas: nove espessuras de lã de rocha, duas de poliuretano e seis de poliestireno expandido	
			2080	Janelas: cinco tipo de vidros e esquadrias	
Liu et al. (2020)	China	RCP4.5 RCP8.4	2035	Transmitância térmica dos vidros	Menores valores de transmitância térmica das janelas e das paredes reduzem o desconforto por calor no interior dos ambientes em torno de 5% no RCP8.5 em 2090, entretanto, a absortância das paredes é uma medida altamente sensível no desempenho do edifício, o autor recomenda valores menores que 0,50.
			2065	Relação de área de janela	
			2090	Transmitância térmica das paredes externas	
				Absortância das paredes externas	

Fonte: a autora (2023)

A partir do breve panorama observado, verifica-se que a estratégia de ventilação natural é a área mais explorada nas pesquisas relacionadas com cenários climáticos futuros. No entanto, as investigações apontam para uma redução da eficácia dessa estratégia na melhoria das condições

internas no futuro. Similarmente, a estratégia de aquecimento solar e resfriamento passivo também demonstra ter uma efetividade limitada nas projeções climáticas futuras. No entanto, destaca-se a crescente importância da implementação da estratégia de sombreamento. No que se refere às medidas passivas de projeto, apontam que a redução da transmitância térmica das janelas e das paredes pode contribuir para a mitigação do desconforto térmico nos espaços internos. Além disso, destaca-se a relevância de manter os valores de absorvância das paredes abaixo de 0,50.

Wang et al. (2021) destacam que as estratégias bioclimáticas passivas são altamente sensíveis e comprometidas às mudanças climáticas, em função de variabilidade das variáveis climáticas, como temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação. Portanto, as abordagens bioclimáticas tradicionalmente aplicadas, baseadas em dados climáticos históricos, podem não ser eficazes em períodos futuros (Shen et al., 2020). Nesse contexto, a seleção de estratégias bioclimáticas e soluções de projeto passivas deve ser orientada pela capacidade de promover resiliência nos edifícios e de manter níveis satisfatórios de conforto térmico para os ocupantes (Pajek e Kosir, 2021).

Consequentemente, torna-se necessário adaptar as edificações para enfrentar os desafios futuros e garantir melhores condições internas com níveis aceitáveis de conforto térmico. Os projetistas devem priorizar a redução dos ganhos solares, recorrendo a abordagens como sombreamento, adoção de vidros de proteção solar avançada e otimização da envoltória do edifício por meio da seleção de materiais de alta refletividade e baixa transmitância térmica. É importante considerar que o aumento da ventilação natural, em contextos de mudanças climáticas, pode resultar em um acúmulo de calor interno nas edificações, expondo os ocupantes a temperaturas elevadas. Diante disso, enfrentar o desafio de encontrar medidas de adaptação apropriadas que garantam o conforto térmico dos ocupantes será crucial. Além disso, será necessário adotar uma combinação integrada e otimizada de várias estratégias para alcançar uma adaptação eficaz das edificações.

2.5 CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES FRENTE AOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: BREVE PANORAMA DA DEMANDA PARA RESFRIAMENTO

As mudanças climáticas têm ocasionado um aumento na frequência e na intensidade das ondas de calor, as quais podem exercer um impacto adverso nas temperaturas internas das edificações, podendo atuar negativamente na saúde dos ocupantes e aumentar os riscos de

mortalidade. Nesse contexto, à medida que o clima se torna mais quente, as estratégias passivas de projeto, tais como ventilação natural, sombreamento, inércia térmica e isolamentos, podem não ser suficientes para manter as condições internas das edificações em um nível aceitável de conforto térmico (Barea et al., 2022).

Consequentemente, a implementação de sistemas de resfriamento ativo se torna primordial para proteger os ocupantes contra o superaquecimento das edificações e garantir o conforto térmico. No entanto, essa mudança de paradigma resultou em um aumento considerável na demanda de resfriamento, bem como das emissões de GEE, agravando ainda mais os riscos associados às mudanças climáticas.

Conforme relatório da Agência Internacional de Energia (IEA), ao longo das últimas quatro décadas, o consumo global de energia aumentou aproximadamente 92%, e os edifícios respondem por mais de 30% das emissões globais de GEE em escala mundial, contribuindo com 40% do consumo global de energia (Guzovic et al., 2022). Nas regiões desenvolvidas, cerca de 40% das emissões de CO₂ estão diretamente vinculadas ao consumo energético dos edifícios. Andrić et al. (2020) destaca que mais de 30% do consumo mundial de energia é atribuído ao setor residencial, destinado a assegurar o conforto térmico dos ocupantes.

Além disso, o consumo global de energia para fins de resfriamento no setor de construção tem experimentado um crescimento constante, tendo mais que triplicado entre 1990 a 2016 (IEA, 2019). No Brasil, o setor de construção civil é responsável por 51% do consumo energético, sendo 26%, 17% e 8% são destinados às residências, aos comércios e aos edifícios públicos, respectivamente. Estimativas indicam que o consumo energético por sistemas de ar-condicionado, principalmente, em ambientes residenciais, aumentou cerca de 237% no período de 2005 a 2017 (EPE, 2018).

Nesse cenário, com o aumento das temperaturas decorrentes das alterações climáticas, uma elevação substancial na demanda energética para resfriamento é observada, em paralelo a uma diminuição na demanda por aquecimento. Khourchid, Ajjur e Al-Ghamdi (2022) e Abolhassani et al. (2023) conduziram uma análise sistemática da demanda energética em edificações sob a influência das mudanças climáticas em âmbito mundial. Baseados na classificação de Köppen-Geiger, que divide as regiões em quatro zonas climáticas, e na classificação da ASHRAE Standard 169 (2020), que define nove zonas climáticas. Dessa forma, com foco no aumento da demanda energética para resfriamento, destacam-se as pesquisas mais recentes por zona climática levantadas pelos autores (Tabela 15 e 16).

Tabela 15 – Pesquisas da demanda energética em edificações sob a influência das mudanças climáticas considerando classificação de Köppen-Geiger

Zona Climática	Cenário de emissões	Tipologia	Aumento da demanda energética para resfriamento	Autor
Clima tropical (A)	RCP4.5	Residencial	+ 60% em 2099	Ukey e Rayi (2021)
	RCP8.5		+50% em 2099	
Clima árido (B)	A2	Residencial	+ 349% em 2050 e +645% em 2080	Ciancio et al. (2020)
Clima temperado (C)	RCP2.6	Comercial	+ 400% em 2080	Li et al. (2021)
	RCP4.5		+ 500% em 2080	
	RCP8.5		+ 600% em 2080	
	RCP 4.5		+ 15% em 2080	
	RCP8.5	Residencial	+ 104% em 2080	De Mais et al. (2021)
	SSP1-2.6		+ 37,1% em 2080	Chakraborty et al. (2021)
	SSP2-4.5		+ 47,5% em 2080	
	SSP3-7.0		+ 85,3% em 2080	
SSP5-8.5	+ 121% em 2080			
Clima frio (D)	RCP8.5	Residencial	+ 32,2% em 2056-2075	Jafarpur e Berardi (2021)
	A2	Residencial	+ 472% em 2050 e + 871% em 2080	Ciancio et al. (2020)

Fonte: adaptado de Khourchid, Ajjur e Al-Ghamdi (2022)

Tabela 16 – Pesquisas da demanda energética em edificações sob a influência das mudanças climáticas considerando classificação de ASHRAE 169

Zona Climática	Cenário de emissões	Tipologia	Aumento da demanda energética para resfriamento	Autor
Extremamente quente (0)	B1	Residencial	+60% em 2100	Oliveira, Chen e Ren (2010)
	A1F1		+130% em 2100	
Muito quente (1)	A1F1	Residencial	+36,4% em 2040–2069	Shen (2017)
	A2		+26,6% em 2040–2069	
Quente (2)	A2	Residencial	+58,3% em 2050	Triana, Lamberts e Sassi (2018)
Quente úmido (3)	RCP2.6	Comercial	+100% em 2090	Cellura et al. (2018)
	RCP4.5		+160% em 2090	
	RCP6.0		+200% em 2090	
	RCP8.5		+300% em 2090	
Mista (4)	RCP2.6	Comercial	+16% em 2020	Wang, Liu e Brown (2017)
Frio (5)	A2	Comercial	+150% em 2080	Shen (2017)
Frio úmido (6)	A2	Residencial	+110% em 2080	Wang e Chen (2014)
Muito frio (7)	B1	Residencial	+18,5% em 2100	Wan et al. (2012)
Ártico (8)	Há uma falta de investigações para a zona 8, exigindo mais estudos de avaliação de impacto das mudanças climáticas.			Abolhassani et al. (2023)

Fonte: adaptado de Abolhassani et al. (2023)

Com base nos últimos cenários de emissões do AR6, Xiong et al. (2023) realizaram uma análise da demanda energética para aquecimento e resfriamento de edifícios residenciais típicos da China. Esses cenários de emissões abrangeram o período de 2020 a 2100 e incluíram SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Os resultados mostram que a demanda por aquecimento em Pequim, em 2020, era de 61,8 kWh/m², mas diminuiu significativamente, atingindo 1,8 kWh/m²

em 2100 no cenário SSP5-8.5. No entanto, a demanda por resfriamento, que era de 5,9 kWh/m² em 2020, aumentou substancialmente, chegando a 45,0 kWh/m² em 2100 no cenário SSP2-4.5. Isso representa um aumento acentuado na demanda por resfriamento, quatro vezes maior em 2100 em comparação com 2020, com um crescimento particularmente significativo após 2060.

Considerando o panorama das pesquisas apresentadas, é evidente que as mudanças climáticas terão um impacto significativo no desempenho térmico das edificações, resultando em um aumento significativo na demanda energética para resfriamento. Esse impacto será mais pronunciado em zonas climáticas quentes, como em climas temperados e quentes e úmidos, nos quais os ambientes internos tendem a se aquecer mais. Assim, o resfriamento se tornará uma necessidade crucial para manter as condições de conforto térmico. Em zonas frias, observa-se um aumento na demanda energética para resfriamento, mas em proporções menores, principalmente, nas regiões com climas muito frios e frios. No entanto, é importante destacar que em regiões de clima frio úmido, essa demanda apresenta um aumento significativo, estimado em cerca de 110% até 2080. Em um cenário de emissões A2, esse aumento pode chegar a impressionantes 871% até 2080.

Nesse contexto, a crescente demanda por sistemas de resfriamento ativo, como o ar-condicionado, gera preocupações substanciais, uma vez que as matrizes energéticas já estão sobrecarregadas no clima atual e podem não ser capazes de atender a demanda energética futura. Guevara-Luna et al. (2022) destacam que as matrizes energéticas baseadas em tecnologias sensíveis às variações climáticas, como hidrelétricas e painéis fotovoltaicos, podem enfrentar problemas para garantir o fornecimento de energia elétrica no futuro. Libra et al. (2021) também apontam que, devido ao aumento da demanda por climatização, o potencial de fornecimento de energia pode ser reduzido em função das altas temperaturas resultantes das alterações climáticas. Isso terá um impacto negativo no desempenho dos painéis fotovoltaicos, reduzirá as chuvas e, como consequência, diminuirá a quantidade de água disponível nas barragens das hidroelétricas. Além disso, os autores ressaltam que as mudanças climáticas podem resultar em um aumento na intensidade de furacões e tornados, prejudicando os parques de energia eólica.

Portanto, é evidente que as mudanças climáticas estão impondo desafios significativos às atuais matrizes energéticas, ressaltando a necessidade de buscar soluções mais sustentáveis e resilientes para atender à crescente demanda por resfriamento, sem agravar ainda mais os impactos ambientais e as emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, a implementação de estratégias

nos sistemas de resfriamento, bem como a adaptação das edificações, pode contribuir para a redução da demanda energética, especialmente, diante dos cenários de aquecimento projetados.

A adoção de estratégias de resfriamento passivo, tais como sombreamento, ventilação natural, isolamento térmico e inércia térmica, desempenha um papel fundamental na mitigação da dependência de sistemas de resfriamento ativo, como o ar-condicionado. Essas estratégias demonstram a capacidade de manter as condições internas das edificações em níveis aceitáveis de conforto térmico, ao mesmo tempo em que minimizam a demanda por um consumo excessivo de energia.

Além disso, o investimento em tecnologias de resfriamento mais eficientes e ecologicamente sustentáveis, como sistemas de refrigeração com baixo consumo de energia, sistemas de resfriamento evaporativo e adoção de fontes de energias renováveis, apresenta potencial significativo para a redução das emissões de GEE. Estas tecnologias proporcionam um resfriamento mais eficaz, promovendo, assim, a redução do consumo energético e minimizando o impacto ambiental.

2.5.1 Estratégias aplicadas aos sistemas de condicionamento de ar para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas

As edificações têm a importante função de resistir e proteger seus ocupantes das intempéries e eventos climáticos. Entretanto, as mudanças climáticas têm exigido adaptações e a implementação de sistemas de resfriamento para lidar tanto com o superaquecimento presente quanto com as condições extremas de calor previstas para o futuro. Neste contexto, grande parte do consumo energético das edificações residenciais está direcionada à operação de sistemas de ventilação e resfriamento, incluindo ventiladores e ar-condicionado (Shaik et al. 2023).

Além disso, a população está mais preparada e disposta a investir mais recursos financeiros adicionais para criar ambientes mais confortáveis, particularmente através do uso de condicionadores de ar. Isso é impulsionado, em grande parte, pelo fato de que muitas pessoas passam uma parte significativa do tempo em ambientes fechados, principalmente, ao aumento do trabalho em regime de Home Office. Durante a pandemia de COVID-19, o consumo de energia de sistemas de ar-condicionado na China aumentou em mais de 128%, resultando em um aumento de 39,2% no consumo energético das edificações, bem como em uma ampliação no período de uso, passando de 8 (oito) para 15 (quinze) horas por dia (Oliveira et al., 2021; Mokhtari e Jahangir, 2021).

Esse aumento na demanda energética está relacionado ao crescimento do acesso à energia em países em desenvolvimento e ao aumento da qualidade de vida das populações (Nastasi et al., 2022). A IEA (2019) prevê que o número de aparelhos de ar-condicionado em edifícios residenciais aumentará de 1,6 bilhão para 5,6 bilhões em todo o mundo até 2050. Além disso, Bakthavatchalam et al. (2022) destacam que a cada segundo, dez novos aparelhos de ar-condicionado são adquiridos. No período de 1990 a 2016, as vendas anuais de aparelhos de ar-condicionado quadruplicaram, atingindo 135 milhões de unidades, com um total de aproximadamente 1,6 bilhão de unidades em funcionamento até o final de 2016 (IEA, 2019).

Neste contexto, em 2016, os Estados Unidos apresentaram uma quantidade significativa de condicionadores de ar instalados, representando cerca de 50% do total, sendo a maior parte no setor residencial (IEA, 2019). Em 2018, o Japão apresentou maior porcentagem de edifícios equipados com ar-condicionado, seguindo pelos Estados Unidos e Coreia. Em países com climas quentes, como Brasil, África do Sul e Índia, aproximadamente 20% dos domicílios possuem ar-condicionado, mas essa demanda está crescendo rapidamente.

Apesar de serem eficazes na redução dos riscos, os sistemas de ar-condicionado ainda não estão disponíveis ou são inacessíveis em muitas regiões. Além disso, mesmo onde esses sistemas estão presentes, falhas mecânicas ou interrupções na rede podem torná-los inoperantes (IEA, 2022). Segundo a IEA (2019), cerca de 44% da população mundial vive em regiões de clima quente, mas apenas 12% têm acesso a aparelhos de ar-condicionado. Isso significa que, aproximadamente, 1,1 bilhão de pessoas em todo o mundo não têm acesso a sistemas de resfriamento mecânico.

O aumento na demanda energética e os impactos das mudanças climáticas, principalmente em regiões quentes, apresentam desafios significativos para as matrizes energéticas. No Brasil, desde 2015, o país enfrenta uma crise crítica no abastecimento de água e energia, em função do aumento da temperatura e à substancial redução do período de chuvas desde 1953 (Oliveira, Souza e Silva, 2017). Como resultado, a demanda crescente por energia para resfriamento pode sobrecarregar a capacidade de fornecimento em muitos países, resultando em apagões que deixam as populações sem energia e vulneráveis.

Outro aspecto crítico a ser considerado é o aumento significativo das emissões de GEE provenientes do consumo energético dos sistemas de resfriamento (Kwok, Schoetter e NG, 2022). Isso significa que os sistemas de ar-condicionado estão contribuindo ainda mais para as mudanças climáticas. Apesar dos avanços na eficiência dos sistemas de ar-condicionado, como os modelos split, ao longo dos anos, esses ainda são responsáveis pela maior parte do consumo energético e

das emissões de CO₂ em edificações residenciais, comerciais e industriais (Bakthavatchalam et al., 2022). A cada kWh de energia produzida, aproximadamente 7,2 g de dióxido de enxofre (SO₂), 0,93 kg de dióxido de carbono (CO₂) e 4,38 g de monóxido de nitrogênio (NO) são liberados no ambiente (Hasan, 2022).

Além disso, de acordo com Xu et al. (2013), se as emissões de hidrofluorcarbonetos (HFCs) não forem controladas, elas podem contribuir com quase 20% do aquecimento global. Mesmo com a substituição gradual dos refrigerantes à base de clorofluorcarbono (CFCs) por HFCs, ainda há preocupações quanto à pegada de carbono desses refrigerantes, que pode ser até 1000 vezes maior do que o potencial de aquecimento global do dióxido de carbono (Paula et al., 2020). Portanto, a redução das emissões de GEE provenientes dos sistemas de resfriamento é crucial para atingir as metas estabelecidas no Acordo de Paris e limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C (Dong et al., 2020), contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas.

Nesse contexto, a dependência excessiva dos sistemas de ar-condicionado por parte dos ocupantes pode se tornar um desafio em tempos de mudanças climáticas. O uso prolongado desses sistemas leva os ocupantes a um ciclo vicioso, no qual eles se acostumam a ambientes com temperaturas mais frias, reduzindo sua tolerância e preferência por temperaturas mais elevadas para o conforto térmico (Buranvi, 2019). Essa dependência do ar-condicionado no ambiente construído representa um desafio para o século XXI, uma vez que restringe a exposição dos ocupantes a temperaturas mais altas, impactando sua percepção de conforto térmico (Kwok, Schoetter e NG, 2022) e até mesmo a adoção de estratégias passivas de resfriamento. Além disso, evidências indicam que a exposição prolongada a ambientes climatizados aumenta os riscos da chamada síndrome do edifício doente, afetando, negativamente, a qualidade do ar e a saúde dos ocupantes (Cheung e Jim, 2019).

Além disso, o calor liberado pelos sistemas de ar-condicionado contribui para o aumento da temperatura nas áreas urbanas, podendo intensificar o fenômeno da ilha de calor urbana e impactar nas temperaturas internas das edificações (Kwok, Schoetter e NG, 2022). Por fim, os equipamentos de ar-condicionado projetados e utilizados atualmente podem ter sua eficiência comprometida devido ao impacto das mudanças climáticas, principalmente, com o aumento das temperaturas, o que reduz a efetividade do Coeficiente de Desempenho (COP) do sistema. Com temperaturas externas mais elevadas, os equipamentos funcionarão por períodos de tempo mais longos, o que pode levar a desligamentos frequentes para evitar o superaquecimento e danos ao sistema.

Portanto, é essencial reduzir, significativamente, a quantidade de energia necessária para operar os sistemas de ar-condicionado, seja por meio da adaptação climática dos edifícios ou pela utilização de sistemas mais eficientes. É fundamental adotar tecnologias cada vez mais eficientes e sustentáveis para reduzir o consumo de energia e as emissões, sem comprometer a qualidade do ar interior e o conforto térmico dos ocupantes (Li et al., 2020).

Além disso, é importante considerar as possíveis mudanças na demanda energética devido aos novos hábitos e comportamentos dos ocupantes pós-pandemia, como o aumento do trabalho em Home Office (Tootkaboni et al., 2021). Dessa forma, com a utilização de sistemas mais eficientes e a ampliação das preferências de temperatura dos ocupantes se pode evitar a emissão de até seis bilhões de toneladas de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Dong et al., 2020).

O IPCC (2022) categoriza as medidas de mitigação em três categorias: i) mitigação das mudanças climáticas, ii) medidas de mitigação e iii) cenário de mitigação, todas com o objetivo central de reduzir as emissões de GEE causadas pelas atividades humanas. Essas categorias desempenham papéis distintos, mas complementares, na busca por soluções para combater as mudanças climáticas (Tabela 17).

Tabela 17 – Categorias de mitigação definidas pelo IPCC

Categorias de mitigação	Definição do IPCC (2022)
Mitigação das mudanças climáticas	Uma intervenção humana para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.
Medidas de mitigação	Política climática, tecnologias, processos e práticas que contribuem para a mitigação das mudanças climáticas.
Cenário de mitigação	Um sistema que responde à implementação das medidas de mitigação das mudanças climáticas.

Fonte: adaptado de IPCC (2022)

Neste contexto, observa-se a interdependência das três categorias, todas direcionadas para a redução das emissões de GEE. Nesta pesquisa em particular, o cenário de mitigação diz respeito à adaptação da edificação por meio de estratégias passivas de projeto. A implementação das medidas de mitigação consistirá na melhoria do sistema de condicionamento de ar, através da revisão dos níveis de controle de temperatura e do aprimoramento da eficiência energética, com o objetivo de reduzir as horas de funcionamento e o consumo de energia, limitando-as apenas a períodos de maior estresse térmico. Dessa forma, tais medidas contribuirão para a mitigação das mudanças climáticas.

Edifícios de Energia Quase Zero (nZEB) são reconhecidos como uma solução eficiente para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas, projetados para reduzir quase que totalmente

o consumo de energia não renovável. No entanto, esta pesquisa se concentra em investigar edifícios que não se enquadram na categoria de nZEB, ou seja, não utilizam fontes de energia renovável como medida para reduzir o consumo energético e mitigar as mudanças climáticas. Nesse contexto, pressupõe-se que as edificações consideradas possuem sistemas de ar-condicionado, e o foco da pesquisa se concentra na melhoria da eficiência desse sistema e no seu uso adequado como estratégia para reduzir o consumo energético e contribuir com a mitigação das mudanças climáticas.

Uma estratégia eficaz para reduzir o consumo energético dos sistemas de ar-condicionado é ajustar os termostatos de operação para resfriamento e aquecimento. Jafarpur e Berardi (2021) enfatizam que a regulagem do setpoint (termostato) é um dos métodos mais eficazes para alcançar economia energética em edifícios, mas é importante considerar a eficácia desse ajuste em relação ao conforto térmico dos ocupantes.

Nesse sentido, a utilização dos limites superior e inferior do modelo de conforto adaptativo tem sido aplicada como termostato para resfriamento e aquecimento, respectivamente, com o objetivo de adaptar as temperaturas de operação do sistema de ar-condicionado, principalmente, diante das mudanças climáticas. Essa abordagem leva em consideração a capacidade de adaptação dos ocupantes a diferentes condições térmicas, proporcionando conforto e, ao mesmo tempo, reduzindo o consumo energético do sistema.

Destaca-se que pesquisas que relacionem eficiência energética do sistema de condicionamento de ar com alterações climáticas e edificações residenciais não são tão difundidas, o que representa uma lacuna de pesquisa. Em um cenário de clima mais quente, a eficiência do equipamento de ar-condicionado se torna primordial para a operação eficaz e a redução do consumo energético. Rahif et al. (2022) destacam que os parâmetros mais influentes no consumo energético dos sistemas de condicionamento de ar são: temperaturas de termostato de resfriamento e aquecimento, eficiência energética do sistema e a escolha do sistema (tipo split ou janela). Portanto, a seleção eficiente desses parâmetros é crucial para o desempenho energético da edificação.

Bienvenido-Huertas (2021) analisou o consumo energético utilizando termostatos adaptativos, ou seja, utilizando os limites do modelo de conforto adaptativo para definir os ajustes do termostato de aquecimento e resfriamento. O estudo foi realizado considerando o cenário de emissões A2 para os períodos de 2050 e 2100, em uma edificação residencial multifamiliar na Espanha. O autor considerou um COP de 2,1 para aquecimento e 2,0 para resfriamento, e duas variações de ajuste do termostato: uma estática, com temperatura de 25°C para resfriamento e 17°C

para aquecimento, e outra adaptada conforme os limites do modelo de conforto da EN 16708 (2019).

O autor ressalta que a utilização dos termostatos adaptativos, com temperaturas de 27,2°C para resfriamento, reduziu o consumo energético em 55,3% em 2050 e 84,9% em 2080. Ao aumentar as temperaturas do termostato para 29,2°C, o consumo energético para resfriamento foi reduzido em aproximadamente 67,5% em 2050 e 99,2% em 2080. Além disso, o autor implementou medidas adaptativas na envoltória da edificação e analisou o desempenho em conjunto com os termostatos adaptativos, o que permitiu maiores reduções no consumo energético, alcançando cerca de 91,9% para aquecimento e 100% para resfriamento (Bienvenido-Huertas, 2021).

Mehmood et al. (2022) avaliaram o impacto das mudanças climáticas no consumo energético de uma edificação residencial no Paquistão, utilizando o cenário de emissões A2 para os períodos de 2020, 2050 e 2080. Além das medidas adaptativas, os autores adotaram duas temperaturas de termostato para resfriamento, sendo 24,0°C durante o período diurno no período histórico e 25,0°C durante o período noturno, e para o futuro ajustaram para 25,0°C no período diurno e 26,5°C no período noturno. Os autores ressaltam que, entre as medidas implementadas na edificação, o ajuste do termostato foi a mais eficiente, reduzindo a demanda energética em cerca de 19,74 kWh/m² no período de 2080 em relação ao histórico.

Mostafazadeh, Eirdmoussa e Tavakolan (2023) avaliaram a otimização de estratégias passivas implementadas em uma edificação residencial de três andares no Irã, assim como as medidas de eficiência do sistema de resfriamento. Os autores consideraram um sistema de ar-condicionado do tipo split, com um COP de 2,0 como base, variando a eficiência para 3,2; 3,3; 3,5 e 5,0. Além disso, eles ajustaram o termostato para temperaturas de 25,0°C, 26,0°C, 27,0°C e 28,0°C, levando em consideração o cenário de emissões A2 para o período de 2050. Os autores ressaltam que sistemas de condicionamento de ar mais tecnológicos e eficientes serão ideais para a redução do consumo energético no futuro, alcançando uma redução de 82%. Além disso, os autores sugerem que uma temperatura de termostato para aquecimento e resfriamento de 20,0°C e 27,0°C, respectivamente, é uma solução energeticamente eficiente.

Jafarpur e Berardi (2021) quantificam o impacto da temperatura dos termostatos na demanda energética de edifícios no Canadá, considerando o cenário de emissões RCP8.5 para o período de 2056-2075. Os autores otimizaram as temperaturas dos termostatos de resfriamento entre 25,0°C e 27,0°C, enquanto o termostato de aquecimento foi fixado em 21,0°C. À medida que as temperaturas dos termostatos de resfriamento aumentaram, houve uma redução de 2,8% na

demanda energética nos cenários climáticos futuros. Os autores ressaltam que a cada aumento de 1,0°C na temperatura do termostato, espera-se uma redução na demanda energética de resfriamento de aproximadamente 0,9%.

Gao et al. (2023) realizaram uma otimização de medidas de economia de energia e parâmetros de operação em um edifício na China, considerando um sistema de ar-condicionado com um COP de 3,35 e o cenário de emissões RCP4.5 para os períodos de 2030, 2040, 2050 e 2060. Os autores consideraram termostatos de resfriamento variando de 24,0°C a 27,0°C e termostatos de aquecimento variando de 17,0°C a 20,0°C. Os termostatos de resfriamento e aquecimento com temperaturas mais baixas foram eliminados, pois não resultaram em uma redução do consumo energético. No ano de 2060, as temperaturas de termostato de resfriamento acima de 26,0°C e de aquecimento acima de 20,0°C foram mais eficazes na redução do consumo energético. Os autores destacam que o ajuste dos termostatos será necessário para reduzir o consumo energético, as emissões de gases de efeito estufa e manter o ambiente interno em condições habitáveis.

Torres et al. (2023) avaliaram a perspectiva da demanda energética de um edifício unifamiliar de interesse social com área de 59m² no México, considerando os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos de 2050 e 2100. Os autores realizaram a otimização de três termostatos de resfriamento para o sistema de condicionamento de ar, com um COP de 1,8. Os termostatos foram definidos como 20,0°C (ambiente frio), 23,0°C (ambiente intermediário) e 26,0°C (ambiente fresco). Utilizando o termostato de 20,0°C, a demanda energética ultrapassa 12.500 kWh/ano, o que corresponde a um consumo de 216 kWh/m². À medida que a temperatura do termostato aumenta para 23,0°C e 26,0°C, a demanda energética reduz em 27% e 54% respectivamente, resultando em uma demanda de 156 kWh/m² e 97 kWh/m² no cenário atual. Considerando o período de 2050, a demanda energética será de 256 kWh no cenário RCP4.5 e de 265 kWh no cenário RCP8.5. Aumentando as temperaturas dos termostatos, a demanda reduz em 20% em ambos os cenários. A tabela 18 apresenta o resumo das pesquisas acima.

Tabela 18 - Resumo das pesquisas que investigam as melhorias da eficiência do sistema de ar condicionado e do seu uso

Autor	País	Cenário	Período	Medidas	Principais resultados
Bienvenido-Huertas (2021)	Espanha	A2	2050 2100	COP de 2,1 e 2,0 para aquecimento e resfriamento	A utilização dos termostatos adaptativos, com temperaturas de 27,2°C para resfriamento (categoria I do modelo adaptativo), reduziu o consumo energético em 55,3% em 2050 e 84,9% em 2080.
				Termostato para resfriamento e aquecimento estático de 25,0°C e 17,0°C	
Mehmood et al. (2022)	Paquistão	A2	2020 2050 2080	Termostato de resfriamento adaptativo conforme modelo de conforto EN 16708 (2019)	Aumentando as temperaturas do termostato para 29,2°C (categoria III do modelo adaptativo), reduziu o consumo energético para resfriamento em torno de 67,5% em 2050 e 99,2% em 2080.
				Aumento da temperatura do termostato de resfriamento em 1,0°C	
Mostafazadeh, Eirdmoussa e Tavakolan (2023)	Irã	A2	2050	Variação do COP para 3.2, 3.3, 3.5 e 5.0	Sistemas de condicionamento de ar mais tecnológicos e eficientes serão ideias para a redução do consumo energético no futuro, alcançado 82%, além disso, os autores sugerem que uma temperatura de termostato de aquecimento e resfriamento de 20,0°C e 27,0°C é uma solução energeticamente eficiente.
				Variação do termostato de resfriamento de 25,0°C, 26,0°C, 27,0°C e 28,0°C	
Jafarpur e Berardi (2021)	Canadá	RCP8.5	2056-2075	Variação do termostato de resfriamento entre 25,0°C a 27,0°C	À medida que os termostatos de resfriamento foram aumentando, a demanda energética reduziu em 2,8% nos cenários climáticos futuros. Os autores ressaltam que a cada 1,0°C de aumento da temperatura do termostato é esperado a redução da demanda energética de resfriamento em torno de 0,9%.
Gao et al. (2023)	China	RCP4.5	2030 2040 2050 2060	Variação do termostato de resfriamento entre 24,0°C a 27,0°C	Temperaturas de termostato de resfriamento e aquecimento acima de 26,0°C e de 20,0°C, respectivamente, foram mais eficazes na redução do consumo energético em 2060.
				Variação do termostato de aquecimento entre 17,0°C a 20,0°C	

Fonte: a autora (2023)

As pesquisas mencionadas têm utilizado diferentes valores de COP, como 1,8; 2,0; 2,1 e 3,3, variando também as temperaturas dos termostatos. No entanto, Mostafazadeh, Eirdmoussa e

Tavakolan (2023) variaram o COP em um intervalo de 3,2 a 5,0, além de ajustarem o termostato, e obtiveram uma redução do consumo energético futuro de 82%. Assim, observa-se que sistemas de ar-condicionado mais eficientes são ideais para reduzir o consumo energético e as emissões de GEE. No entanto, é importante destacar que sistemas mais eficientes e tecnológicos tendem a ser mais caros.

Em relação às temperaturas dos termostatos, a variação é de 24,0°C a 29,2°C para resfriamento, sendo frequentemente utilizados os limites adaptativos de conforto como referência para definir os termostatos (Bienvenidos-Huertas, 2021). Observa-se que temperaturas de termostatos acima de 26,0°C são mais eficientes para reduzir a demanda energética de resfriamento, e o ideal está em torno de 27,0°C e 29,0°C, podendo alcançar reduções de até 99,2% em cenários climáticos futuros.

Essas pesquisas contribuem para a compreensão da influência dos termostatos na demanda energética de edifícios, destacando a necessidade de adoção de medidas adaptativas e a busca por soluções energéticas mais eficientes. Através da otimização dos termostatos e do desenvolvimento de estratégias de controle térmico adequadas, é possível alcançar reduções significativas no consumo de energia, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade do setor de construção.

No entanto, é importante considerar que adotar os limites adaptativos de conforto se torna uma preocupação quando não se leva em conta a configuração precisa do termostato. A precisão dos equipamentos, geralmente, é limitada a 1,0°C ou 0,5°C (nos modelos mais recentes), o que significa que um valor de limite superior de 22,26°C seria impraticável em aparelhos de ar-condicionado reais. Portanto, é necessário realizar ajustes para garantir uma configuração viável do termostato.

No Brasil, a NBR 15.575 (ABNT, 2021) e a Instrução Normativa do Inmetro para Edificações Residenciais (INI-R – BRASIL, 2022) recomendam o uso de termostatos com temperatura de 23,0°C para resfriamento e 20,0°C para aquecimento em edificações residenciais. No entanto, é importante destacar que essas normas não foram desenvolvidas com o objetivo específico de mitigar as mudanças climáticas e considerar cenários de emissões.

É relevante mencionar que a INI-R demonstra uma certa preocupação com as emissões de GEE, uma vez que em sua metodologia de classificação de eficiência energética são estabelecidos critérios para determinar o percentual de redução ou aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂), levando em consideração o consumo total de energia e os fatores de emissão de CO₂

provenientes da queima de combustíveis e da geração de eletricidade (Brasil, 2022). No entanto, é importante ressaltar que essas normas ainda não abordam de forma abrangente as implicações das mudanças climáticas e a necessidade de redução significativa das emissões de GEE.

Diante desse contexto, é fundamental que futuras revisões dessas normas considerem a importância da eficiência energética e da redução das emissões de GEE, levando em conta cenários de mudanças climáticas e a busca por soluções mais sustentáveis no setor de edificações residenciais. Portanto, torna-se interessante investigar o aumento das temperaturas dos termostatos para resfriamento e a utilização de equipamentos com maior eficiência, especialmente em climas quentes, como o do Brasil, levando em consideração os cenários climáticos futuros. Isso possibilitará o planejamento e a recomendação de equipamentos e termostatos mais eficientes, visando a redução do consumo energético e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

3 ESTUDOS PILOTOS PARA O APRIMORAMENTO DA METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo tem como objetivo apresentar estudos pilotos realizados para aprimorar a metodologia da pesquisa. Os estudos pilotos desempenham um papel importante ao testar e validar os procedimentos adotados, identificar possíveis limitações e realizar ajustes necessários. De acordo com Mackey e Gass (2005), um estudo piloto é um “teste em pequena escala dos procedimentos, materiais e métodos propostos para determinada pesquisa”, ou seja, é uma versão reduzida do estudo completo, que permite alterações, melhorias e definições do processo metodológico que precede a investigação em si. Neste contexto, este capítulo apresenta:

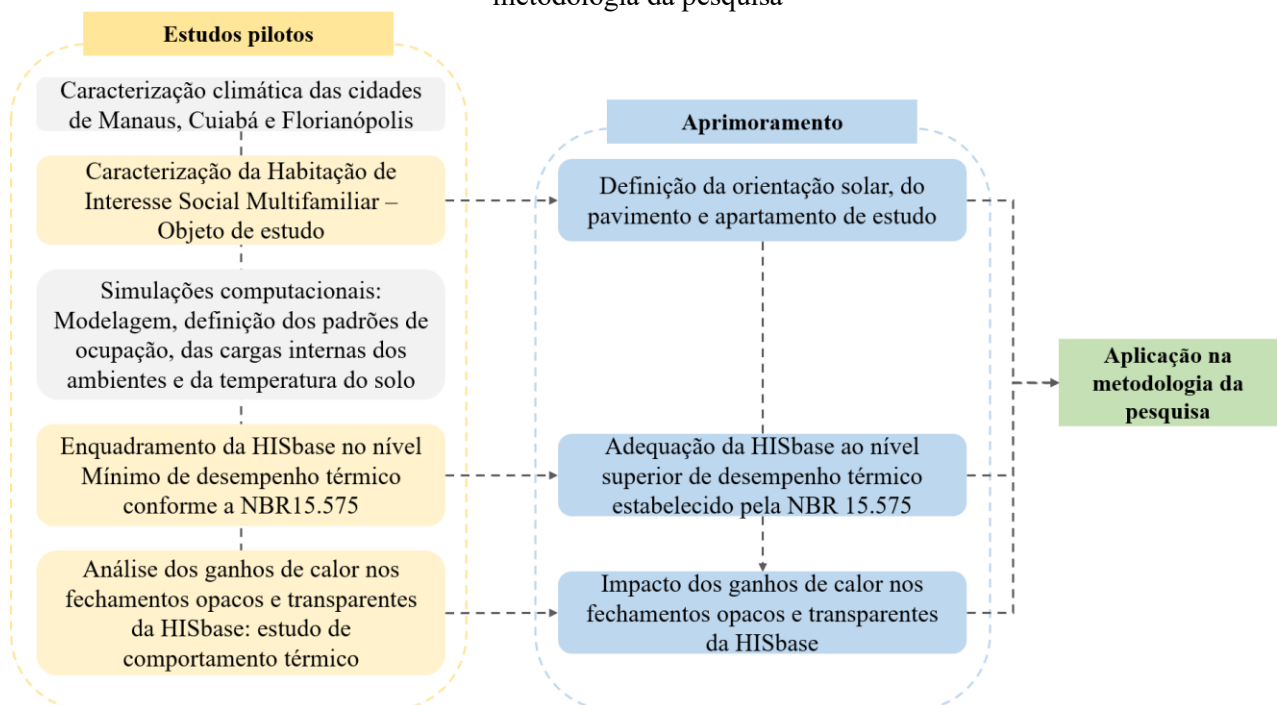
- a) **Caracterização climática das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis:** consiste em apresentar os dados climáticos das normais climatológicas em três períodos distintos, além de dados climáticos “sintéticos”, como o TMYx e SWERA, e compará-los para uma compreensão mais ampla dos padrões climáticos dessas regiões.
- b) **Caracterização da Habitação de Interesse Social Multifamiliar (HIS):** tem como objetivo caracterizar o objeto de estudo da pesquisa em termos de layout, dimensões, esquadrias e sistema construtivo. Além disso, busca-se analisar a orientação da fachada principal, pavimento e apartamento que apresentam condições internas menos favoráveis. A partir dessas definições, o objeto de estudo é denominado como "HISbase". No entanto, é importante destacar que esta pesquisa não se concentra em análises específicas de HIS, tais como custos ou melhorias de layouts, entre outras.
- c) **Simulações computacionais:** apresenta o processo metodológico da modelagem térmica da HISbase utilizando do *Plugin OpenStudio*, da definição dos padrões de ocupação, das cargas internas dos ambientes conforme procedimento de simulação estabelecido pela NBR15.575 (ABNT, 2021) e da inclusão da temperatura do solo. As simulações computacionais foram realizadas no software EnergyPlus, versão 9.1.
- d) **Enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico conforme a NBR 15.575:** consiste em adequar as janelas para atender ao percentual de abertura para ventilação e de elementos transparentes da HISbase. Em seguida, são realizadas simulações computacionais na condição ventilada naturalmente da HISbase, em sua condição real e na condição de referência estabelecida pela NBR 15.575. A comparação entre o modelo real e o de referência permite verificar o nível de desempenho térmico da habitação e realizar adequações necessárias para atender ao nível mínimo. Ressalta-se que

as avaliações de desempenho térmico da HISbase não serão realizadas conforme a NBR 15.575, a normativa é utilizada apenas como referência para os *Inputs* das simulações computacionais.

- e) **Análise dos ganhos de calor nos fechamentos opacos e transparentes da HISbase:** consiste em realizar um estudo do comportamento térmico das paredes, cobertura, piso e janelas, além das cargas térmicas provenientes de pessoas, iluminação e equipamentos. Esta análise busca identificar qual fechamento apresenta maior impacto nos ganhos de calor e, assim, adaptá-los para reduzir esses impactos e melhorar as condições internas da HISbase diante dos cenários climáticos futuros.

Dessa forma, ressalta-se que os resultados obtidos, como a definição da orientação solar, do pavimento e apartamento de estudo; a adequação da HISbase ao nível mínimo de desempenho térmico e os impactos dos ganhos de calor nos fechamentos opacos e transparentes, serão utilizados como ponto de partida na metodologia da pesquisa. Assim, as definições realizadas na HISbase serão avaliadas em cenários climáticos futuros, investigando as condições térmicas internas, a fim de identificar situações de vulnerabilidade dos ocupantes e analisar a capacidade das estratégias passivas de projeto como medidas de adaptação. A Figura 6 apresenta o fluxograma do processo metodológico dos estudos pilotos.

Figura 6 – Fluxograma do processo metodológico dos estudos pilotos para o aprimoramento da metodologia da pesquisa



Fonte: a autora (2023)

3.1 METODOLOGIA – ESTUDOS PILOTOS

3.1.1 Caracterização climática das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis

Com o objetivo de analisar o desempenho térmico das edificações residenciais e a vulnerabilidade dos ocupantes em diferentes tipos climáticos brasileiros, foram selecionadas três capitais: Manaus-AM, Cuiabá-MT e Florianópolis-SC. A seleção das cidades foi realizada com o propósito de investigar o impacto das mudanças climáticas em regiões de climas distintos, abrangendo áreas quentes e úmidas, climas quentes e secos, bem como regiões com clima mais ameno e estações climáticas bem definidas. A intenção é análise dessa diversidade climática que as cidades representam e pela importância de compreender o impacto das mudanças no clima em diferentes contextos geográficos e climáticos no Brasil. As características das cidades são apresentadas na Tabela 19 e no Apêndice A.

Tabela 19 - Características das cidades analisadas

Cidade	Latitude	Longitude	Altitude	Bioma	População (hab.) ¹	Tipo Climático ²	Tipo Climático ³
Manaus	03°08'07"S	60°01'34"W	92m	Amazônia	2.219.580	Am	0A
Cuiabá	15°36'56"S	56°06'01"W	165m	Cerrado	590.118	Aw	0A
Florianópolis	46°38'02"S	48°35'00"W	3,0m	Mata Atlântica	516.524	Cfa	2A

Fonte: ¹Com base no Censo de 2010 do IBGE (IBGE, 2017); ²Com base na classificação climática de Köppen-Geiger (Peel; Finlayson; McMahon, 2007); ³Com base na classificação climática da ASHRAE Standard 169 (2020)

Para fins de análise para compreender o perfil e a evolução climática de cada região de estudo, foram investigadas as três Normais Climatológicas (NC) disponíveis para os períodos de 1931-1960, 1961-1990 e 1981-2010 fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com base em dados coletados por estações meteorológicas. Além disso, foram incluídos nas análises os chamados anos "sintéticos", os quais foram construídos a partir de um banco de dados, sendo esses o TMYx e o SWERA. A análise comparativa é apresentada na Figura 53 no Apêndice A.

Em Manaus, as NC indicam um aumento gradual na média anual de temperatura, passando de 26,7°C no período de 1961-1990 para 27,0°C em 1981-2010 e atingindo 27,4°C no intervalo de 1991-2020. Por outro lado, tanto o TMYx (26,5°C para o período de 2007-2021) quanto o SWERA (26,8°C para o período de 1975-2001) apresentam valores próximos às NC.

Em Cuiabá, observa-se um padrão semelhante de aumento gradual nas médias anuais de temperatura ao longo dos períodos analisados, com valores de 25,8°C, 26,1°C e 26,5°C para os

intervalos de 1961-1990, 1981-2010 e 1991-2020, respectivamente, de acordo com as NC. O TMYx e o SWERA apresentaram médias anuais de temperatura consistentes entre si, registrando 26,7°C para ambos os conjuntos de dados.

Em Florianópolis, há uma tendência de aquecimento ao longo dos anos, conforme indicado pelas NC, com médias anuais de temperatura de 20,4°C, 20,9°C e 21,1°C para os períodos de 1961-1990, 1981-2010 e 1991-2020, respectivamente. Tanto o TMYx (21,2°C para o período de 2007-2021) quanto o SWERA (20,8°C para o período de 1975-2001) mostram-se semelhantes às NC.

Portanto, considerando apenas os dados medidos das três cidades analisadas, observa-se que, em um período de 59 anos, houve um aumento de aproximadamente 0,8°C na temperatura média anual (equivalente a um aumento de 0,13°C por década). Esse fato corrobora as projeções apresentadas pelo IPCC, cujo aumento da temperatura média global é de 0,15°C a 0,30°C por década (IPCC, 2022). Casagrande e Alvarez (2013) apontam que, a partir da década de 1920, há uma tendência de aumento das temperaturas no Brasil, a variação alcançou registros de aumento de 0,8°C no ano de 2000, em relação às médias de 1961-1990.

É importante ressaltar que a análise desses dados climáticos contribui para uma compreensão mais ampla dos padrões climáticos e auxilia na identificação de tendências e possíveis impactos. Essas observações corroboram com as previsões de aquecimento dados pelo IPCC e reforçam a importância de monitorar e estudar as mudanças climáticas em escala regional e global. Portanto, o estudo detalhado dessas variações climáticas, principalmente o impacto nas edificações é fundamental para a elaboração de estratégias de adaptação dos efeitos adversos causados pelas mudanças climáticas.

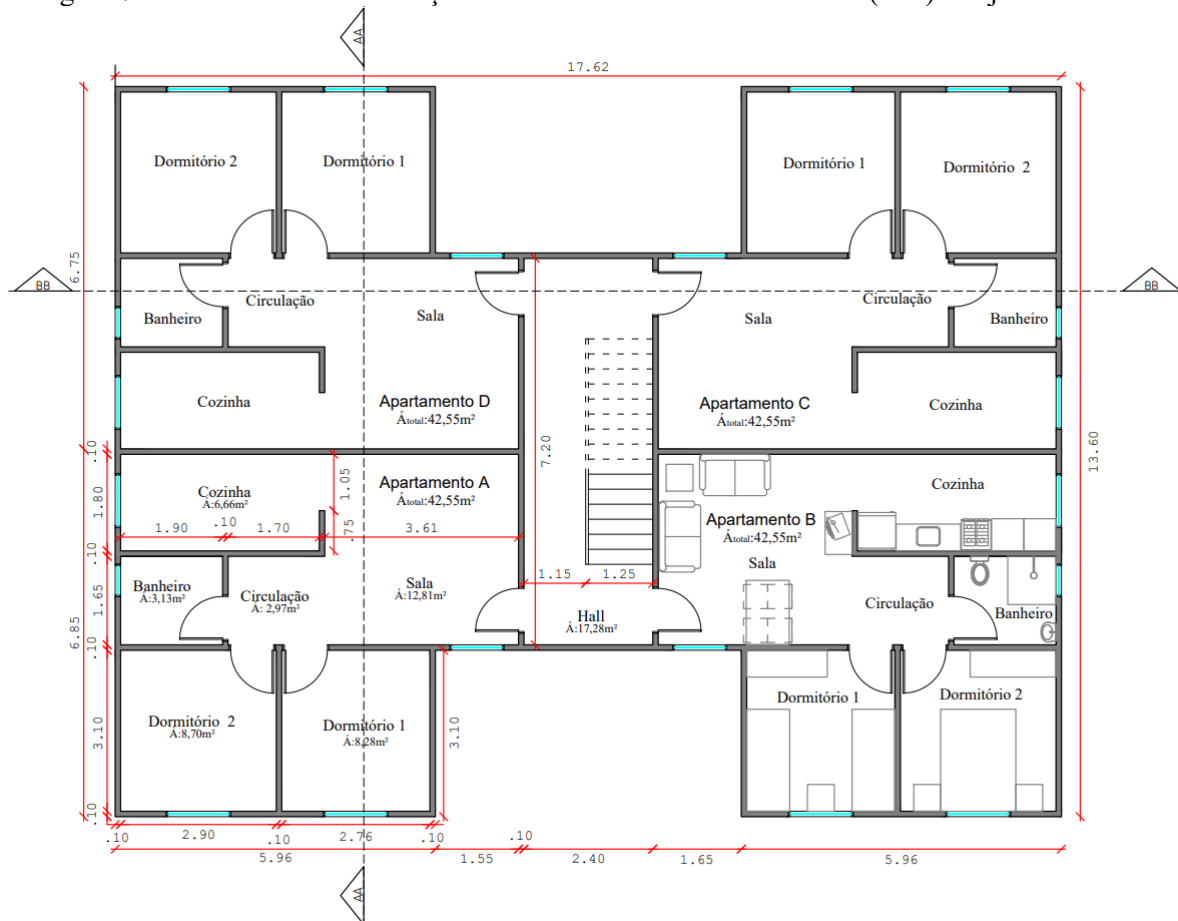
3.1.2 Caracterização da Habitação de Interesse Social Multifamiliar – Objeto de estudo

O objeto de estudo desta pesquisa se refere a um recorte voltado para as Habitações de Interesse Social (HIS) do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), cujo objetivo é suprir o déficit habitacional brasileiro. Ressalta-se que a escolha da HIS como objeto de estudo foi realizada devido sua representatividade no contexto brasileiro. Portanto, esta pesquisa não se concentra em análises específicas das HIS, tais como custos, mudanças de layouts, entre outras. No entanto, Triana, Lamberts e Sassi (2015) apresentam um estudo detalhando sobre as Habitações de Interesse Social no contexto brasileiro.

Desta maneira, esta pesquisa se concentra na HIS Multifamiliar de apartamentos com planta H para o nível de renda 1 e denominada “HISbase”. A habitação é composta por quatro pavimentos,

sendo o térreo, dois pavimentos intermediários e a cobertura, com quatro apartamentos em cada pavimento. Cada apartamento possui uma área total de 42,55m² e inclui os seguintes ambientes: Dormitório 1 (8,28m²), Dormitório 2 (8,70m²), Banheiro (3,13m²), Cozinha (6,66m²), Sala (12,81m²) e Circulação (2,97m²). O pé-direito do apartamento é de 2,60 metros. Apresenta-se a planta baixa na Figura 7.

Figura 7 – Planta baixa da Habitação de Interesse Social Multifamiliar (HIS) - objeto de estudo



Fonte: Triana, Laberts e Sassi (2015)

As esquadrias são compostas por estrutura metálica e vidro de 4mm, sendo constituídas por duas folhas de correr (uma fixa e uma móvel) nos dormitórios 1 e 2, sala e cozinha. As dimensões das aberturas, assim como os fatores de ventilação e iluminação correspondentes, estão descritas na Tabela 20. Já as portas são do tipo de madeira, possuindo dimensões de 0,8 x 2,10m.

Tabela 20 - Dimensões originais das aberturas da HISbase e atendimento aos critérios da NBR15.575

Esquadrias	Sala	Cozinha	Quarto 1	Quarto 2
Dimensões (m)	1,60x1,00	1,20x1,00	1,20x1,20	1,20x1,20
Área (m ²)	1,60	1,20	1,44	1,44
Área efetiva de ventilação (m ²)	0,70	0,54	0,65	0,65
Fator ventilação (%)	0,45	0,45	0,45	0,45

Fonte: Triana, Lamberts e Sassi (2015)

Os fechamentos verticais da HISbase são compostos por painéis de concreto (10cm) e o fechamento horizontal é constituído por telhas de fibrocimento (1cm), ático e laje de concreto (10cm), e o piso é revestido com cerâmica (1cm). Para determinar as propriedades termofísicas dos materiais de construção, utilizou-se a normativa NBR 15.220 (ABNT, 2003), que expressa a Absortância (α), Calor Específico (c), Condutividade Térmica (γ) e Densidade (ρ), além da Transmitância Térmica (U) e Capacidade Térmica (Ct) (Tabela 21). A câmara de ar possui uma resistência térmica de $0,21\text{m}^2\text{K/W}$, alta emissividade e espessura superior a 5cm.

Tabela 21 - Propriedades termofísicas dos materiais construtivos originais da HISbase

	Envoltória	Composição	Esp. (cm)	α	c (J/kg.K)	γ (W/m ² .K)	ρ (kg/m ³)	U (W/(m ² .K))	Ct (kJ/m ² .K)
HISbase	Parede externa/interna	Painel de concreto	10,00	0,30	1,00	1,75	2200	4,40	240
	Cobertura	Telha Fibrocimento	1,00	0,65	0,84	0,65	1400	2,06	233
		Laje de concreto	10,00	0,30	960	1,20	1300		

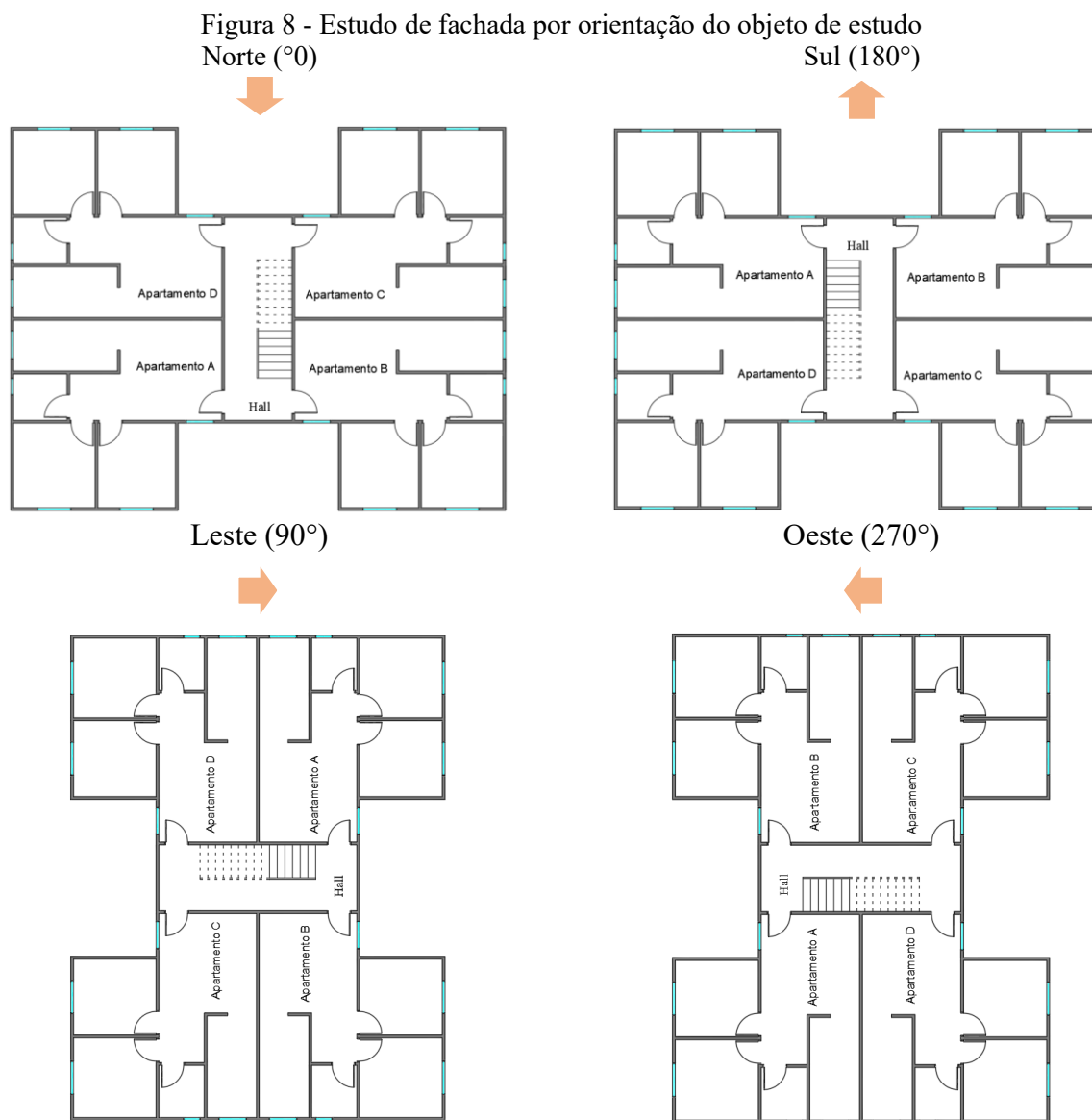
Fonte: Triana, Lamberts e Sassi (2015)

Sabe-se que a orientação solar e o pavimento em que se encontra o apartamento analisado de uma edificação desempenham um papel crucial nas trocas térmicas e, conseqüentemente, nas condições térmicas dos ambientes internos. No contexto deste trabalho, que se concentra em conjuntos residenciais multifamiliares, é importante considerar que as edificações podem ser implantadas em várias orientações solares, o que influencia diretamente a quantidade de radiação solar incidente nas fachadas ao longo do dia.

Além disso, é relevante destacar que essas edificações possuem quatro pavimentos, incluindo o térreo em contato direto com o solo e a cobertura, que recebe uma maior incidência de radiação solar direta. Essas características podem resultar em diferentes níveis de exposição solar e, conseqüentemente, em variações nas condições térmicas dos apartamentos localizados em diferentes pavimentos.

Partindo da premissa de que a orientação solar e o apartamento mais desfavorável resultam em maiores riscos de vulnerabilidade dos ocupantes e em um maior consumo energético para manter condições térmicas adequadas em seu interior, sendo de suma importância analisar e compreender tais implicações nessas condições. Portanto, com o objetivo de verificar a orientação mais desfavorável do ponto de vista térmico, foram realizadas quatro simulações computacionais da temperatura interna do ar (Temp,int.) na condição de ventilação natural, posicionando a fachada

principal para o Norte (0°), Sul (180°), Leste (90°) e Oeste (270°) (Figura 8). O procedimento de simulação está descrito no item 3.3.3.



Fonte: a autora (2023)

A partir das simulações se buscou identificar o pavimento e o apartamento que apresentam as condições internas mais desfavoráveis. Para consolidar os resultados, realizou-se uma média ponderada dos Ambientes de Permanência Prolongada (APP) de cada apartamento, resultando em um único valor de temperatura média anual. Em seguida, calculou-se a média de todos os apartamentos para obter um valor único de temperatura média anual para cada pavimento. Essas análises constituem o ponto de partida para futuras investigações, nas quais a HISbase será avaliada

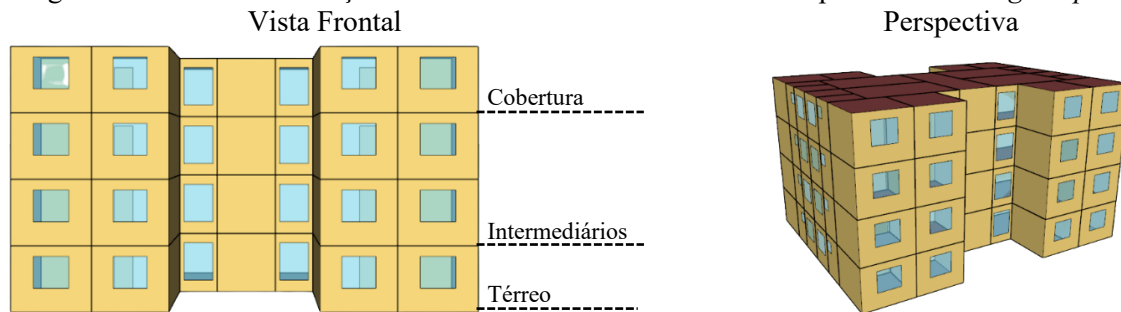
levando em consideração a orientação, pavimento e apartamento, aspectos que demonstraram ser mais desfavoráveis em termos de temperaturas internas.

3.1.3 Simulações computacionais: modelagem, definição dos padrões de ocupação, das cargas internas dos ambientes e da temperatura do solo

A simulação computacional permite a análise do desempenho térmico e energético de edifícios, levando em consideração a tipologia, geometria, sistemas construtivos, clima de implantação e o comportamento dos usuários no interior das edificações. O software recomendado pela normativa deve ser validado de acordo com a ASHRAE Standard 140 (2004). Dessa forma, optou-se pelo uso do software EnergyPlus, versão 9.1, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), em função de sua capacidade de utilizar arquivos climáticos atuais e futuros. Assim, a simulação envolve as etapas de modelagem da geometria, incluindo a inserção das propriedades termofísicas dos materiais, configuração dos padrões de uso dos ambientes e equipamentos, e determinação da temperatura do solo.

Para a modelagem da geometria da edificação se utilizou o *Plugin Open Studio* no software SketchUP, versão 2017. Os ambientes de permanência prolongada foram considerados como zonas térmicas. De acordo com a NBR15.575 (ABNT, 2021), as unidades habitacionais multifamiliares devem ser divididas em térreo, pavimentos tipos e cobertura. Dessa forma, a modelagem do objeto de estudo foi realizada com quatro Unidades Habitacionais (UH) no térreo, quatro UH nos pavimentos intermediários e quatro UH na cobertura, totalizando quatro pavimentos modelados (Figura 9). As superfícies externas, como paredes, telhado e aberturas, foram configuradas como expostas ao sol e ao vento, enquanto as paredes e aberturas internas foram configuradas sem exposição.

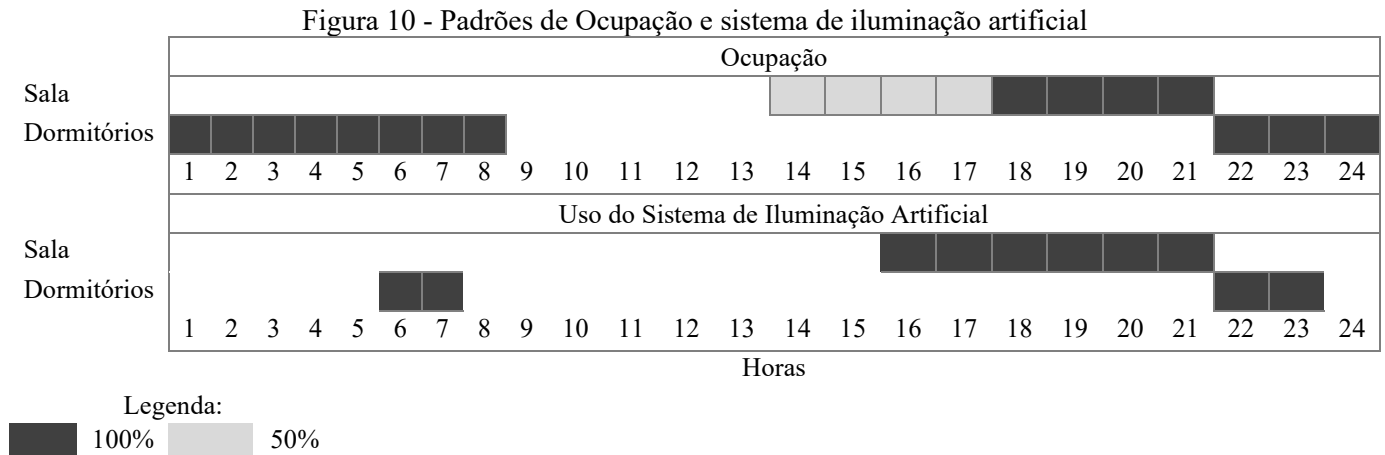
Figura 9 - Vistas da edificação residencial multifamiliar modeladas por meio do *Plugin Open Studio*



Fonte: a autora (2023)

Os padrões de ocupação e ganhos internos foram adotados de acordo com a NBR15.575 (ABNT, 2021). Essa normativa estabelece os padrões de ocupação, o calor dissipado por cada

ocupante e a sua fração radiante para os dias da semana e finais de semana, além do uso de iluminação artificial e de equipamentos (Figura 10). Portanto, foram consideradas duas pessoas por dormitório e quatro pessoas na sala.



Fonte: NBR15.575 (ABNT, 2021)

Para configurar os perfis de ocupação no EnergyPlus, é necessário determinar a taxa metabólica e a fração radiante dos ocupantes ao longo do dia, levando em consideração a atividade desempenhada em cada ambiente (Tabela 22). Além disso, é necessário definir os valores de Densidade de Potência Instalada de Iluminação (DPI) e a fração radiante visível do sistema de iluminação artificial (Tabela 23). A carga interna dos equipamentos é considerada apenas na sala, durante o período de uso das 14:00 às 21:59h, com uma potência de 120W e uma fração radiante de 0,30.

Tabela 22 - Taxa metabólica, fração radiante dos ocupantes conforme a NBR 15.575

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal (W/m ²)	Calor produzido por uma pessoa com 1,80m ² de área de superfície corporal (W)	Fração radiante
Dormitório	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

Fonte: NBR15.575 (ABNT, 2021)

Tabela 23 - Densidade de potência da iluminação e frações radiante e visível conforme a NBR 15.575

Ambiente	DPI (W/m ²)	Fração radiante	Fração visível	Ambiente
Dormitório	5,00	0,32	0,23	Dormitório
Sala	5,00	0,32	0,23	Sala

Fonte: NBR15.575 (ABNT, 2021)

Nas simulações, é necessário inserir diversas variáveis independentes, como os parâmetros termofísicos da edificação e as condições da região de implantação. Entre essas variáveis se destaca a temperatura do solo, especialmente, em edificações térreas ou em apartamentos localizados no térreo, nos quais o piso está em contato direto com o solo. A temperatura do solo é uma variável

complexa, que representa as trocas dinâmicas de calor por condução entre o piso dos ambientes e o solo (Nunes et al., 2019).

O fluxo de calor entre o piso e o solo de uma edificação em contato direto com o solo é um dos aspectos mais influentes em seu desempenho térmico. No software EnergyPlus, a obtenção da temperatura do solo é possível por meio do método *GroundDomain*, que consiste em lidar com diferentes configurações de modelos finitos para obter as temperaturas desejadas. Esses modelos incluem o *FiniteDifference*, *KusudaAchenbach* e o *Xing*.

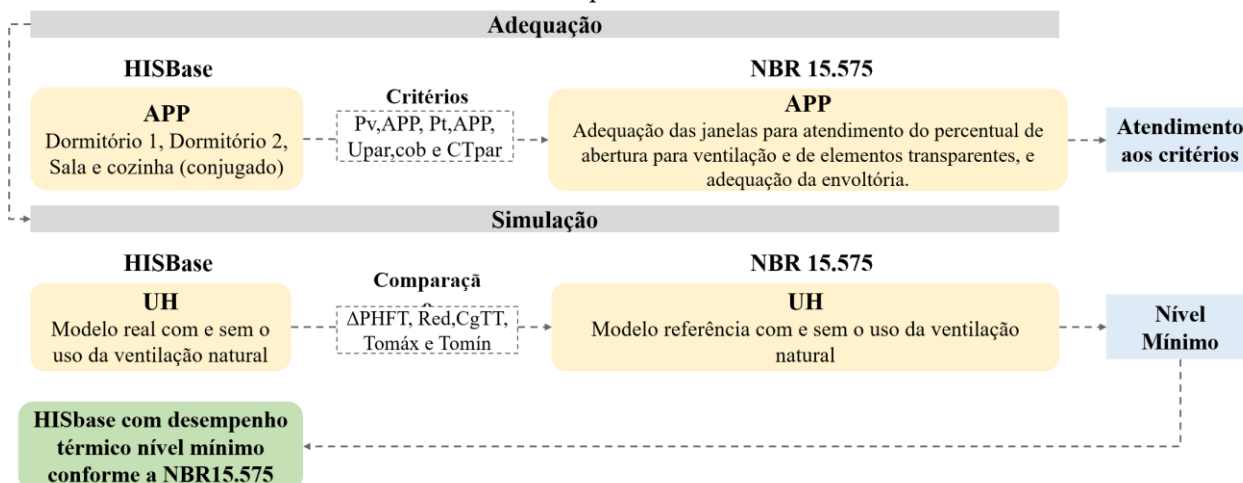
Dessa maneira, nesta pesquisa utilizou-se o método *GroundDomain:FiniteDifference*, pelo fato de considerar as condições do entorno e o arquivo climático histórico e futuros. Para o procedimento metodológico de preenchimento dos *inputs* no software EnergyPlus, foi utilizado o “Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus” (Mazzaferro, Melo e Lamberts, 2015), como referência. O procedimento descrito no manual foi realizado tanto para o arquivo climático histórico quanto para os períodos de 2050 e 2080, considerando o cenário de emissão SSP5-8.5, para as três cidades de análise.

3.1.4 Enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico conforme a NBR 15.575

Para enquadrar no nível mínimo de desempenho térmico, utilizou-se como base o procedimento simplificado da NBR 15.575 (ABNT, 2021), o qual avalia o desempenho térmico da Unidade Habitacional (UH) por meio de comparações das características geométricas das Áreas de Permanência Prolongada (APP) e das propriedades termofísicas dos sistemas construtivos em relação aos valores de referência para Vedações Verticais Externas (SVVE) e de coberturas, descritos na parte quatro e cinco da normativa, respectivamente.

Iniciou-se com a adequação das janelas, a fim de atender ao percentual de abertura para ventilação e aos requisitos de elementos transparentes dos APP, e da envoltória em termos de transmitância e capacidade térmica. Em seguida, utilizou-se o método de simulação computacional como base para atingir o nível mínimo de desempenho térmico. O fluxograma a seguir resume o processo metodológico do enquadramento (Figura 11). O processo metodológico detalhado é apresentando no Apêndice A.

Figura 11 – Fluxograma do processo metodológico para enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico



Fonte: a autora (2023)

Para obtenção a avaliação do nível de desempenho térmico da habitação, utilizou-se a "Planilha de cálculo dos indicadores" (LABEEE, 2023). Além disso, foram feitas adaptações na envoltória da HISbase com o objetivo de alcançar um nível de desempenho mínimo. É importante destacar que a HISbase foi enquadrada no período histórico e considerada como a habitação a ser avaliada em cenários climáticos futuros. A partir dessa habitação, foram realizadas adaptações para reduzir a vulnerabilidade dos ocupantes, que é o foco central deste estudo.

3.1.5 Análise dos ganhos de calor nos fechamentos opacos e transparentes da HISbase: estudo de desempenho térmico

Os materiais e elementos construtivos desempenham um papel crucial no comportamento térmico das edificações. As propriedades térmicas dos materiais, como condutividade, capacidade e resistência térmica, influenciam diretamente o desempenho desses elementos. Portanto, o estudo do fluxo de calor desses elementos e materiais é fundamental para compreender a transferência de energia térmica entre o interior e o exterior de um edifício.

Nesse contexto, os elementos são divididos em dois grupos: os fechamentos opacos e os transparentes. No fechamento opaco, a transmissão de calor ocorre quando há uma diferença de temperatura entre suas superfícies interior e exterior, sendo o fluxo de calor sempre da superfície mais quente para a mais fria. Já no fechamento transparente, essa transmissão de calor pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação.

Segundo Ordenes, Lamberts e Guths (2008), a condução está relacionada ao transporte de energia térmica em um meio sólido, ocorrendo devido ao gradiente de temperatura. Já a convecção

ocorre quando há contato entre um fluido e uma superfície com diferentes temperaturas. Por fim, a radiação é um fenômeno superficial que envolve a emissão de calor de acordo com a temperatura superficial do material. Em relação à condução e convecção nos fechamentos transparentes, o comportamento é semelhante aos fechamentos opacos. No entanto, os ganhos por radiação se tornam o principal fator nesse processo, devido à sua parcela diretamente transmitida para o interior dos ambientes, o que é inexistente nos fechamentos opacos (Ordenes, Lamberts e Guths, 2008).

Dessa maneira, com o objetivo de avaliar qual fechamento apresenta maior impacto nos ganhos de calor e, assim, adaptá-los para reduzir esses impactos e melhorar as condições internas da HISbase diante dos cenários climáticos futuros, foi realizado um estudo dos ganhos de calor por superfície. Para isso, simulou-se a HISbase considerando a fachada principal voltada para o Norte, o pavimento da cobertura, o apartamento A, levando em consideração o enquadramento das aberturas e das paredes externas e internas, para as cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis.

A simulação foi realizada conforme procedimento descrito no item 3.3.3 desta pesquisa. Para os fechamentos opacos, foram obtidos os *Outputs: Surface Inside Face Temperature* e *Surface Outside Face Temperature*. Para os fechamentos transparentes, além dos *Outputs* acima, foram obtidos os *Zone Widdowns Total Heat Gain Rate* e *Zone Widdowns Total Heat Loss Rate*, e para incluir a contribuição dos equipamentos, iluminação e ocupantes, foi obtido o valor total por meio do *Output: Zone Total Internal Heating Rate*.

Os resultados foram obtidos para 8.760 horas, considerando os dormitórios 1 e 2, e sala/cozinha (conjugada), expressos em Watts (W). A partir dos resultados das simulações, calculou-se a densidade de fluxo de calor para os fechamentos opacos (Equação 4 a 6) e para os fechamentos transparentes (Equação 7 e 8) da HISbase. Com o intuito de consolidar os resultados, realizou-se uma soma mensal dos ganhos para cada fechamento, para os períodos diurno (06:00 às 17:00 horas) e noturno (18:00 às 05:00 horas).

$$Q_{\text{condução,parede}} = U_{\text{par}} \times A_{\text{par}} \times (T_{\text{sup,ext}} - T_{\text{sup,int}}) \quad \text{Equação 4}$$

$$Q_{\text{condução,cobertura}} = U_{\text{cob}} \times A_{\text{cob}} \times (T_{\text{sup,ext}} - T_{\text{sup,int}}) \quad \text{Equação 5}$$

$$Q_{\text{condução,piso}} = U_{\text{piso}} \times A_{\text{piso}} \times (T_{\text{sup,ext}} - T_{\text{sup,int}}) \quad \text{Equação 6}$$

$$Q_{\text{condução,vidro}} = U_{\text{vidro}} \times A_{\text{vidro}} \times (T_{\text{sup,ext}} - T_{\text{sup,int}}) \quad \text{Equação 7}$$

$$Q_{\text{ganho,radiação,vidro}} = Q_{\text{conduçãototal,vidro}} - Q_{\text{condução,vidro}} \quad \text{Equação 8}$$

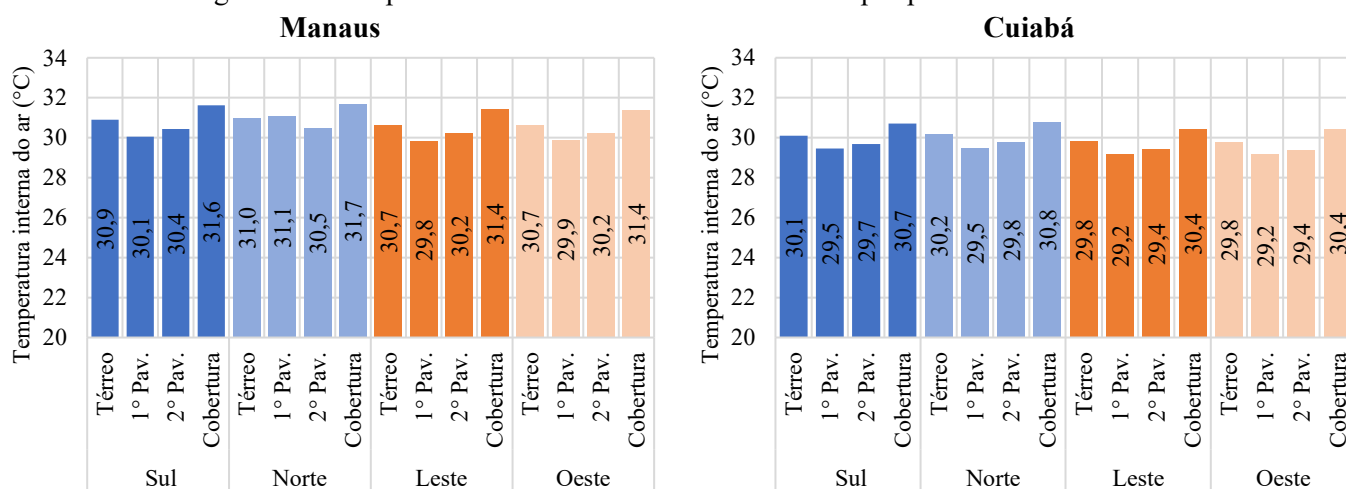
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES - ESTUDOS PILOTOS

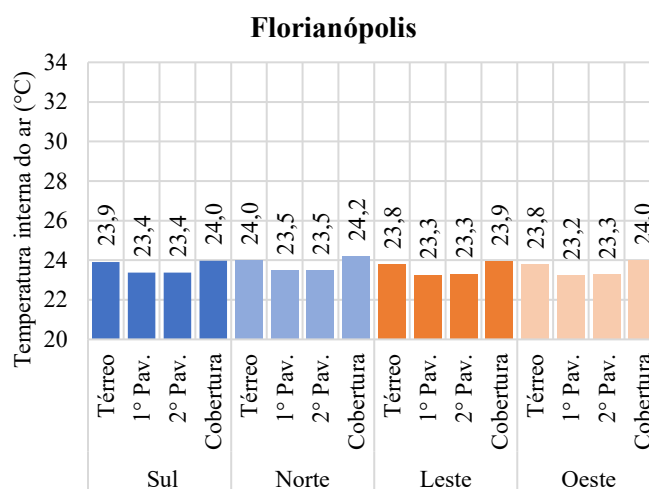
3.2.1 Definição da orientação solar, do pavimento e apartamento de estudo

Após a realização das simulações computacionais, com o objetivo de determinar a orientação solar, pavimento e apartamento para o estudo desta pesquisa, foram obtidas as temperaturas internas médias anuais para as cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis.

Em Manaus, as fachadas principais orientadas para Leste e Oeste apresentam temperaturas internas semelhantes, com diferenças de aproximadamente $0,01^{\circ}\text{C}$ no 1º pavimento. As fachadas voltadas para o Norte e Sul também apresentaram valores de temperatura semelhantes, porém a fachada Norte apresenta temperaturas mais altas, principalmente, na cobertura, atingindo $31,7^{\circ}\text{C}$. Em Cuiabá, o padrão é semelhante ao de Manaus, com diferenças de temperatura em torno de $1,0^{\circ}\text{C}$ entre as cidades. Nas fachadas voltadas para Leste e Oeste, as temperaturas médias anuais são semelhantes nos diferentes pavimentos, enquanto nas fachadas Norte e Sul, tanto no térreo quanto na cobertura, as temperaturas médias anuais ultrapassam os $30,0^{\circ}\text{C}$. Já em Florianópolis, as temperaturas médias anuais em todas as fachadas são em torno de $23,8^{\circ}\text{C}$, destacando-se a fachada Norte na cobertura com o valor mais elevado de $24,2^{\circ}\text{C}$. A Figura 12 apresenta os resultados acima.

Figura 12 – Temperaturas internas do ar em média anual por pavimento da HISBase



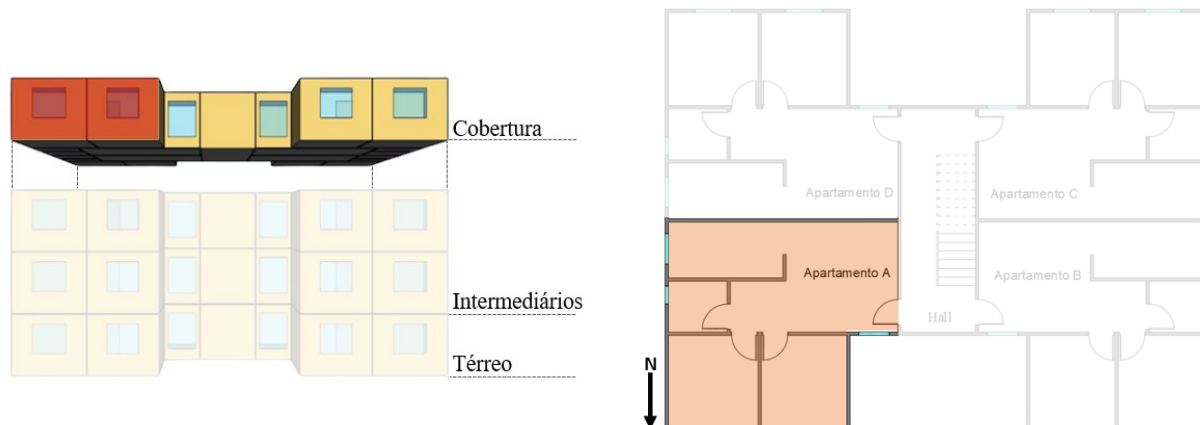


Fonte: A autora (2023)

Portanto, identificou-se que a fachada principal voltada para o Norte e o pavimento da cobertura apresentam as condições mais desfavoráveis em termos de temperatura interna na HISbase em Manaus, Cuiabá e Florianópolis. Dessa forma, as análises serão direcionadas para essa combinação, com o objetivo de investigar e aprimorar as condições internas da HISbase, levando em consideração a vulnerabilidade dos ocupantes diante das mudanças climáticas. Em relação ao apartamento com temperaturas internas do ar médias anuais mais elevadas, considerando a fachada principal orientada para o Norte e o pavimento da cobertura, destaca-se que o apartamento A apresentou as maiores temperaturas em Manaus, Cuiabá e Florianópolis, sendo de 31,5°C, 30,6°C e 24,3°C, respectivamente. Os demais apartamentos deste pavimento apresentaram temperaturas semelhantes, com diferenças de aproximadamente 0,02°C.

Conclui-se que os resultados da análise indicam que a combinação da fachada principal voltada para o Norte e o pavimento da cobertura da HISbase apresenta as condições mais desfavoráveis em termos de temperaturas interna nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis. O apartamento A apresentou as temperaturas internas médias anuais mais elevadas nessas cidades. Portanto, a pesquisa direciona para essa combinação como objeto de estudo para a implementação de estratégias passivas de projeto e nas análises de severidade e vulnerabilidade dos ocupantes frente aos impactos das mudanças climáticas (Figura 12).

Figura 13 – Pavimento, orientação solar e apartamento de estudo



Fonte: a autora (2023)

3.2.2 Adequação da HISbase ao nível mínimo de desempenho térmico estabelecido pela NBR 15.575

A primeira adequação realizada na HISbase se refere ao PV, APP e Pt, APP para as ZB3, ZB7 e ZB8 (região Norte do Brasil), conforme estabelecido pela NBR 15.575 (ABNT, 2021). Ao verificar o cumprimento dos critérios, constata-se que apenas os dormitórios 1 e 2 atendem ao critério de PV, APP nas ZB1 a ZB7, enquanto a sala e cozinha não estão em conformidade. Na ZB8, nenhum ambiente atende ao critério de percentual de ventilação. No que diz respeito ao Pt, APP, todos os ambientes atendem ao critério, com valores inferiores a $\leq 20\%$ (Tabela 24). Dessa forma, as dimensões das aberturas da sala são ajustadas para atender a esse critério nas ZB3 e ZB7, enquanto, na ZB8 (região Norte), as janelas de todos os ambientes são adaptadas para cumprir o critério de Pv, APP (Tabela 25).

Tabela 24 - Dimensões originais das aberturas da HISbase e atendimento aos critérios da NBR15.575

	Esquadrias	Sala	Cozinha	Dormitório 1	Dormitório 2
	Dimensões (m)	1,60x1,00	1,20x1,00	1,20x1,20	1,20x1,20
Originais	Área (m ²)	1,60	1,20	1,44	1,44
(HISbase)	Área efetiva de ventilação (m ²)	0,70	0,54	0,65	0,65
	Fator ventilação (%)	0,45	0,45	0,45	0,45
	P _{v,APP}	6,7	7,8	8,2	
Crítérios	Atende (ZB1 a ZB7)?	Não	Não	Sim	Sim
	Atende (ZB8 - Manaus)?	Não	Não	Não	Não
	Pt,APP	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: a autora (2023)

Tabela 25 – Dimensões ajustadas das aberturas da HISbase conforme critérios da NBR15.575

	Esquadrias	Sala	Cozinha	Quarto 1	Quarto 2
Ajustadas (HISbase – ZB3 e ZB7)	Dimensões (m)	1,50x1,20			
	Área (m ²)	1,80	Não foram realizados ajustes		
	Área efetiva de ventilação (m ²)	0,86			
	Fator ventilação (%)	0,45			
Ajustadas (HISbase – ZB8)	Dimensões (m)	1,50x1,80	1,80x1,20	1,80x1,20	1,80x1,20
	Área (m ²)	2,72	2,16	2,16	2,16
	Área efetiva de ventilação (m ²)	1,32	1,04	1,04	1,04
	Fator ventilação (%)	0,45	0,45	0,45	0,45

Fonte: a autora (2023)

A HISbase, em sua condição real, apresenta as mesmas características necessárias para a construção do modelo de referência, conforme estabelecido pela NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Optou-se, por modificar as paredes externas e internas, e a cobertura da HISbase, visando atender ao nível mínimo de desempenho térmico. Para isso, foram realizados ajustes nas paredes internas e externas, que passaram a ser compostas por argamassa interna e externa de 2,5cm e bloco cerâmico de 9,0cm, e a cobertura pintou de branco, reduzindo a absorvância para 0,3 (Tabela 26). Essas modificações foram apoiadas nos valores de referências de transmitância e capacidade térmica disponibilizadas pelas NBR 15.575 (ABNT, 2021), de forma que atendessem todas as zonas bioclimáticas. Considerou-se a fachada principal orientada Norte (0°) nas simulações computacionais.

Tabela 26 – Adaptação das SVVE da HISbase para atendimento ao nível mínimo de desempenho

	Envoltória	Composição	Esp. (cm)	α	U (W/m².K)	CT (KJ/m².K)
ZB3	Parede externa/interna	Argamassa interna	2,5	0,30	2,46	150
ZB7		Bloco cerâmico	9,0			
ZB8		Argamassa interna	2,5			
ZB3	Cobertura	Telha de Fibrocimento	1,00	0,30	2,06	233
ZB7		Laje de concreto	10,00			
ZB8						

Fonte: a autora (2023)

A partir dessas modificações realizadas, simulou-se a HISbase em sua condição real e na condição de referência, obtendo-se os parâmetros de PHFTUH, TomáxUH e TomínUH, considerando os pavimentos de cobertura, térreo e intermediários (tipo).

Manaus (ZB8) se encontra no intervalo de Temperaturas Externas de Bulbo Seco (TBS_m) $\geq 27,0^{\circ}\text{C}$ (intervalo 3), a faixa de temperatura operativa (PHFT_{APP}) a ser considerada para esse intervalo é de TO_{APP} $< 30,0^{\circ}\text{C}$. Nesse contexto, todas as UH apresentam um PHFTUH de 100%, indicando que todas as horas ocupadas nos dormitórios e sala/cozinha estão dentro da faixa de

TO_{APP}. Dessa forma, pode-se concluir que, em Manaus, com o ajuste das paredes internas e externas da HISbase, todas as UH localizadas na cobertura, nos pavimentos intermediários (tipo) e no térreo atendem ao nível mínimo de desempenho térmico.

Cuiabá (ZB7) se encontra no intervalo de $25,0^{\circ}\text{C} \leq \text{TBS}_m < 27,0^{\circ}\text{C}$ (intervalo 2), a faixa de temperatura operativa (PHFT_{APP}) considerada para esse intervalo é de $\text{TO}_{APP} < 28,0^{\circ}\text{C}$. Na cobertura, as UH do modelo de referência apresentam um PHFT_{UH} em torno de 99,97%, enquanto na HISbase todas as UH da cobertura alcançam um PHFT_{UH} de 100%. Isso indica que todas as horas ocupadas nessas UH estão dentro da faixa de TO_{APP}. Portanto, tanto as UH da cobertura quanto as dos demais pavimentos da HISbase atingem o nível mínimo de desempenho térmico.

Em relação a Florianópolis (ZB3) se encontra no intervalo de $\text{TBS}_m < 25,0^{\circ}\text{C}$ (intervalo 1), a faixa de temperatura operativa (PHFT_{APP}) considerada para esse intervalo é de $18,0^{\circ}\text{C} < \text{TO}_{APP} < 26,0^{\circ}\text{C}$. Na cobertura, as UH do modelo de referência apresentam um PHFT_{UH} em torno de 96,69%, enquanto na HISbase as UH da cobertura alcançam um PHFT_{UH} em torno de 98,18%. Isso indica que 3,31% e 1,82% das horas ocupadas nas UH do modelo de referência e da HISbase, respectivamente, não estão dentro da faixa de TO_{APP}, ou seja, apresentam temperaturas operativas acima de $26,0^{\circ}\text{C}$. Nos demais pavimentos, tanto o modelo de referência quanto a HISbase demonstram que todas as horas ocupadas estão dentro da faixa de TO_{APP}, com exceção do apartamento B do pavimento intermediário. No entanto, é necessário observar que a Tomín da HISbase deve ser igual ou superior à temperatura do modelo de referência, considerando uma redução de tolerância de $1,0^{\circ}\text{C}$. Verifica-se que as Tomín das UH da HISbase são superiores às do modelo de referência em todos os pavimentos. Portanto, as UH da HISbase atingem o nível mínimo de desempenho térmico.

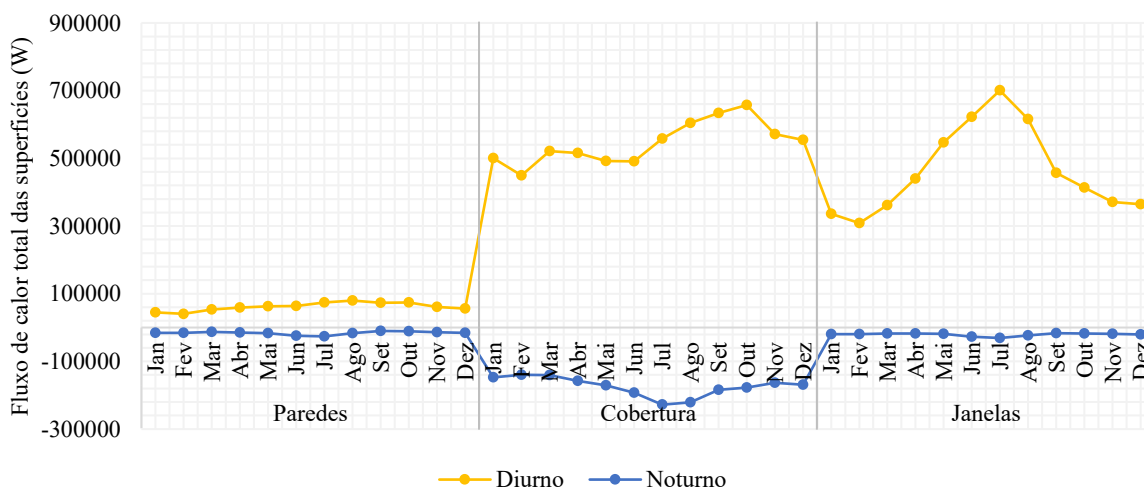
3.2.3 Ganhos de calor nos fechamentos opacos e transparentes da HISbase

Os ganhos de carga por equipamentos, iluminação e ocupação foram definidos de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2021), estabelecendo equipamentos com potência de 120W, ocupação nos dormitórios de $45\text{W}/\text{m}^2$, ocupação na sala de $60\text{W}/\text{m}^2$ e densidades de potência de iluminação de $5\text{W}/\text{m}^2$ nos dormitórios e sala. No entanto, ao totalizar os ganhos provenientes dessas cargas por meio de simulação, obteve-se valores de 70.903W durante o período diurno e 173.877W durante o período noturno, considerando todos os meses, nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis. Esses valores representam em torno de 22% dos ganhos de calor anual na HISbase.

Os resultados obtidos em relação ao piso demonstraram um valor relativamente baixo em comparação aos ganhos dos demais fechamentos, representando aproximadamente 2% dos ganhos anuais. Portanto, os resultados serão apresentados apenas para os ganhos provenientes da cobertura, paredes externas e janelas, dados em soma mensal dos ganhos, para os períodos diurno (06:00 às 17:00 horas) e noturno (18:00 às 05:00 horas).

Em Manaus, os maiores ganhos de calor, no período diurno foram nos fechamentos opacos, com destaque para a cobertura, apresentando valores mais elevados nos meses de agosto a outubro, com uma média de 631.933W. Os fechamentos translúcidos (janelas), também apresentaram altos ganhos de calor por radiação, com destaque para o mês de julho que obteve valor de 700.630W (Figura 13). Por outro lado, ocorrem perdas de calor durante o período noturno, sendo a cobertura de -194.285W no período de agosto a outubro e as janelas de -30.694W em julho. Em relação às temperaturas superficiais em médias mensais, a cobertura apresenta temperatura superficial interna de 28,53°C e externa de 35,20°C no período de agosto a outubro. As janelas apresentam temperaturas superficiais interna e externa de 28,0°C no mês de julho. Portanto, em Manaus, os fechamentos opacos representam 4% dos ganhos de calor pelas paredes, 2% pelo piso, 34% pela cobertura, e as janelas contribuem com 40% dos ganhos de calor.

Figura 14 – Fluxo de calor total das superfícies da HISbase em Manaus

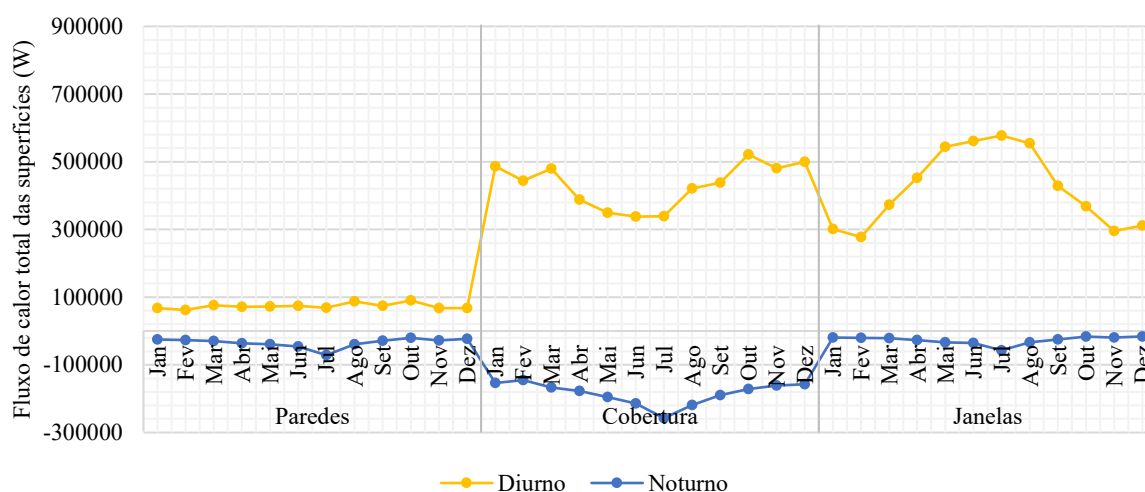


Fonte: a autora (2023)

Em Cuiabá, o comportamento dos ganhos nos fechamentos opacos e translúcidos foi semelhante ao observado em Manaus. Entre os fechamentos opacos, a cobertura apresentou os maiores ganhos de calor, ocorrendo no período de outubro a março, com uma média de 485.313W. Em relação aos fechamentos translúcidos, os maiores ganhos por radiação ocorreram no mês de julho, totalizando 577.587W (Figura 14). Durante os mesmos períodos, houve perdas de calor na

cobertura, totalizando -159.417W, e nas janelas de -57.449W, ocorrendo no período noturno. Em relação às temperaturas superficiais em médias mensais, a cobertura apresenta uma temperatura superficial interna de 30,09°C e externa de 35,12°C no período de outubro a março. As janelas apresentam temperaturas superficiais interna e externa de 25,0°C no mês de julho. Destaca-se que as temperaturas superficiais externas da cobertura excedem 30,0°C em todos os meses, enquanto as das janelas excedem 27,0°C no período de agosto a maio. Neste contexto, em Cuiabá, os fechamentos opacos representam 4% dos ganhos de calor pelas paredes, 1% pelo piso, 31% pela cobertura, e as janelas contribuem com 42% dos ganhos de calor.

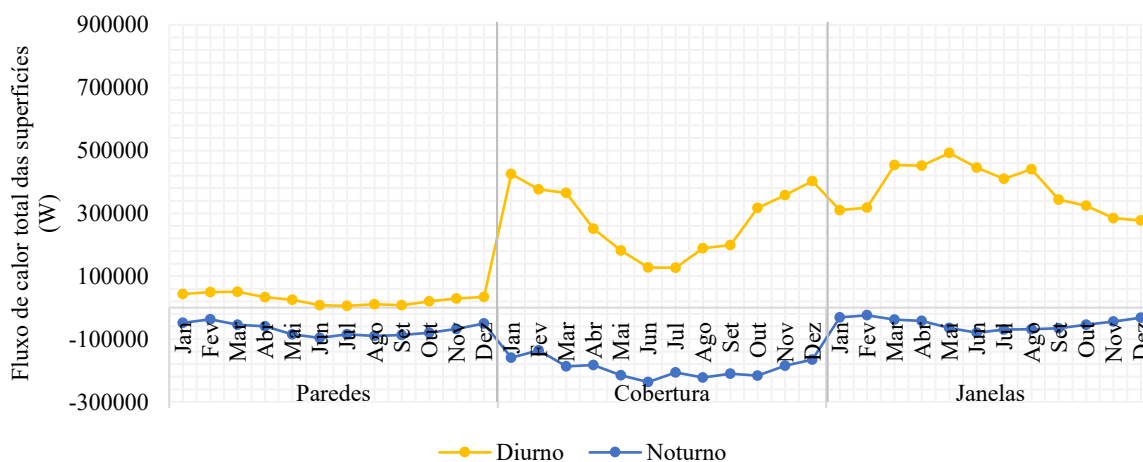
Figura 15 – Fluxo de calor total das superfícies da HISbase em Cuiabá



Fonte: a autora (2023)

Por fim, em Florianópolis, os fechamentos translúcidos apresentam maiores ganhos de calor, com destaque para o período de março a maio, com uma média de 465.770W. No entanto, entre os fechamentos opacos, a cobertura apresentou maiores ganhos, principalmente no período de dezembro a fevereiro, com uma média de ganhos em torno de 401.251W. Em relação às perdas, durante o período noturno, observa-se uma perda de calor na cobertura de -153.853W, e nas janelas de -48.593W. Dessa forma, as temperaturas superficiais internas e externas das janelas, em média mensal, no período de março a maio, são em torno de 23,9°C, enquanto na cobertura a temperatura interna é de 28,41°C e a externa de 32,31°C para o período de dezembro a fevereiro (Figura 15). Assim, em Florianópolis, os fechamentos opacos representam 6% dos ganhos de calor pelas paredes, 1% pelo piso, 24% pela cobertura, e as janelas contribuem com 47% dos ganhos de calor.

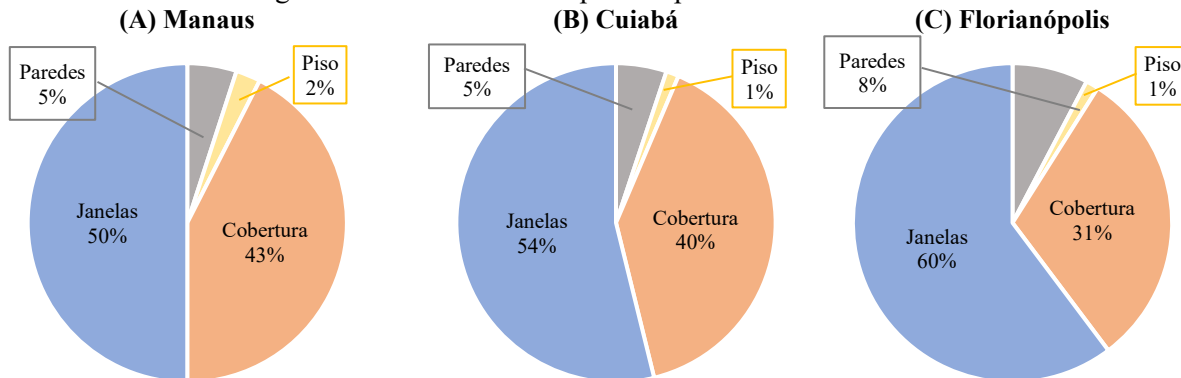
Figura 16 – Fluxo de calor total das superfícies da HISbase em Florianópolis



Fonte: a autora (2023)

Neste contexto, os fechamentos opacos dados em paredes externas, piso e cobertura representam 4%, 2% e 34% em Manaus, 4%, 1% e 31% Cuiabá e 6%, 1% e 24% em Florianópolis dos ganhos de calor, enquanto os fechamentos translúcidos a saber as janelas representam 40% em Manaus, 42% em Cuiabá e 47% em Florianópolis dos ganhos de calor, conforme Figura 16.

Figura 17 – Ganho de calor pelas superfícies da HISbase



Fonte: a autora (2023)

Dessa maneira, conclui-se que a análise dos ganhos de calor para as cidades demonstra o impacto dos fechamentos nos ganhos de calor da HISbase, contribuindo de maneira distintas em cada cidade. Nos fechamentos opacos, principalmente na cobertura, observaram-se maiores ganhos em cidades de clima quente, como Manaus e Cuiabá, durante o período diurno. No entanto, os fechamentos translúcidos também desempenham um papel relevante nos ganhos de calor.

A cobertura, que recebe radiação direta, apresenta impactos mais significativos nos ganhos de calor, o que pode ser justificado pela latitude das regiões de implantação e pela orientação voltada a norte da fachada principal. Em climas amenos, como Florianópolis, os fechamentos

translúcidos apresentaram ganhos de calor consideráveis, porém a cobertura também teve contribuição significativa. Neste contexto, é crucial implementar estratégias passivas de projeto na cobertura, bem como o controle solar nas aberturas, com o intuito de reduzir o consumo energético e proporcionar melhores condições internas para os ocupantes, visando assim a redução dos riscos de vulnerabilidade climática.

3.3 CONCLUSÕES - ESTUDOS PILOTOS

A partir dos resultados obtidos no estudo piloto, observa-se que a combinação da fachada principal voltada para o Norte (0°C) e o pavimento da cobertura apresenta condições mais desfavoráveis com maiores temperaturas internas nas três cidades de análise. A adequação das janelas resultou em aberturas maiores para a sala em Florianópolis e Cuiabá e em todos os ambientes de permanência prolongada em Manaus. Assim, esse ajuste foi considerado para as simulações da investigação das condições internas da habitação. Além disso, foi necessário a melhoria da envoltória e a redução da absorvância das paredes para 0,3 da HISbase para atendimento do nível mínimo de desempenho considerando o tipo climático de Manaus, Cuiabá e Florianópolis. Por fim, observa-se que os maiores ganhos nos fechamentos opacos se deram pela cobertura e dos fechamentos translúcidos pelas janelas.

Dessa maneira, o aprimoramento da metodologia se dá pela definição da orientação solar, pavimento, apartamento e da envoltória como objeto de estudo, entendendo que se parte do ponto de vista que essas condições atendem ao nível mínimo de desempenho térmico. Com o intuito de atender aos objetivos desta pesquisa, a análise dos ganhos de calor apresenta um direcionamento para a aplicação das estratégias passivas de projeto de maneira mais assertivas, visando a melhoria das condições internas da habitação.

4 METODOLOGIA

Inicialmente, é importante destacar que este capítulo adota como base o processo metodológico apresentado no capítulo 3, o qual compreende a caracterização climática das cidades de Manaus-AM, Cuiabá-MT e Florianópolis-SC, bem como a caracterização da Habitação de Interesse Social Multifamiliar como objeto de estudo, e o procedimento das simulações computacionais, incluindo a modelagem, definição dos padrões de ocupação, das cargas internas dos ambientes e da temperatura do solo.

Parte-se da premissa de que a edificação já possui orientação solar, pavimento e apartamento definidos, conforme descrito no Capítulo 3. Além disso, considera-se a adequação da HISbase ao nível mínimo de desempenho térmico estabelecido pela NBR 15.575. Essas adequações servem como base para as primeiras intervenções, visando aprimorar o desempenho térmico da edificação.

Neste contexto, o capítulo de metodologia consiste em apresentar os procedimentos de simulações computacionais para o período histórico e futuro, considerando as projeções climáticas de 2050 (período de 2036-2065) e 2080 (período de 2066-2095). Para tanto, faz-se necessário elaborar arquivos climáticos futuros baseados em cenários de emissões, sendo considerado nessa pesquisa o SSP5-8.5 estabelecidos conforme o Sexto Relatório (AR6) (IPCC, 2022).

Com o objetivo de fornecer recomendações mais específicas e construtivas, definiu-se uma edificação residencial multifamiliar denominada "HISbase" como objeto de estudo, a qual já atende aos pré-requisitos relacionados à envoltória e aberturas para ventilação, como apresentado no capítulo 3. Parte-se do pressuposto de que essa condição deve ser mantida nos cenários futuros, desenvolvendo intervenções que preservem essa mesma condição para adaptar a edificação. Para isso, foram definidas uma tipologia, a multifamiliar de formato H, com 15 intervenções na envoltória, denominadas de "HISenv1" a "HISenv15".

Estas intervenções visam aprimorar a envoltória, levando em consideração a possibilidade de implementação em habitações do programa "Minha Casa, Minha Vida", além de reduzir a transmitância térmica e aumentar a capacidade térmica. A estratégia bioclimática de sombreamento por meio de brises nas aberturas e de inércia térmica por meio de telhado verde na cobertura foram implementados na tipologia que apresentava melhores condições internas para os ocupantes da habitação. Essa adaptação será realizada devido as janelas e cobertura apresentarem maiores

ganhos de calor, conforme descrito no estudo piloto, com o objetivo de reduzir esses ganhos e, assim, diminuir a vulnerabilidade dos ocupantes.

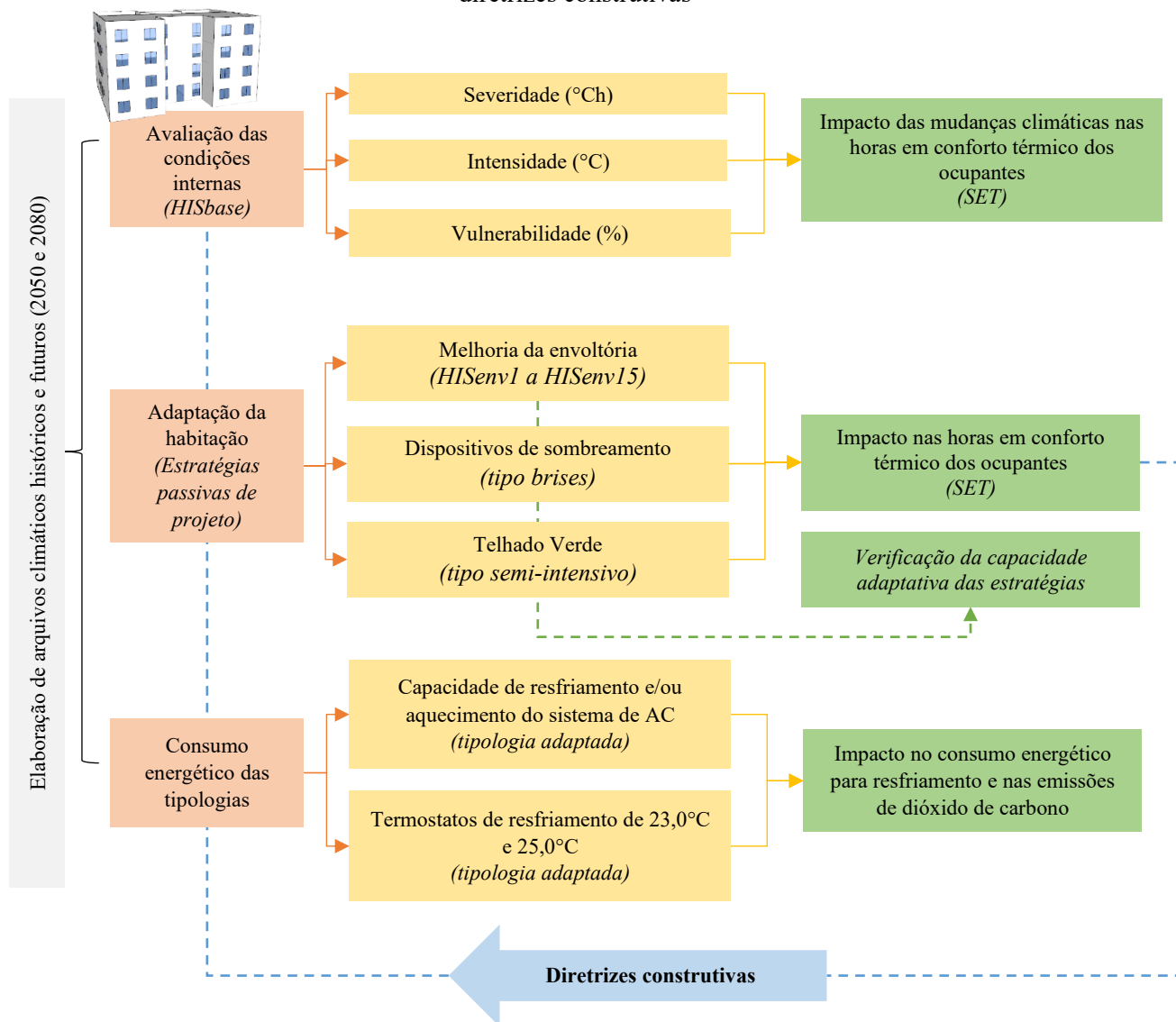
Com base nessas intervenções, realiza-se simulações computacionais para análise das condições internas na condição naturalmente ventilada e investiga-se a exposição dos ocupantes, por meio da análise da severidade e intensidade dos impactos das mudanças climáticas no interior da habitação, utilizando a Temperatura Efetiva Padrão (SET) como indicador. Em seguida, identifica-se em porcentagem, as possíveis horas em vulnerabilidade ao calor e conforto térmico dos ocupantes, utilizando de limiares que demonstram o estado fisiológico, bem como, expressa a situação que o ocupante está no interior da edificação, podendo ser em: neutro, ligeiramente quente, quente e muito quente.

Por fim, investiga-se o consumo energético para resfriamento das tipologias adaptadas em com termostato de resfriamento de 23,0°C e 25,0°C. O objetivo é avaliar o impacto do ajuste da temperatura de resfriamento e da implementação de estratégias passivas de projeto no consumo de energia, bem como nas emissões de dióxido de carbono.

Desta forma, as etapas metodológicas são as abaixo descritas e representadas na Figura 17:

- a) Elaboração dos arquivos climáticos futuro para 2050 (período de 2036-2065) e 2080 (período de 2066-2095);
- b) Investigação da capacidade adaptativa por meio do uso de estratégias passivas de projeto, a saber: melhoria da envoltória, implementação de brises e telhado verde;
- c) Análise da vulnerabilidade dos ocupantes por meio da Temperatura Efetiva Padrão (SET);
- d) Estimativa do consumo energético para resfriamento do sistema de ar-condicionado e cálculo das emissões de dióxido de carbono para as tipologias adaptadas e,
- e) Propostas de recomendações projetuais, como diretrizes construtivas para obter melhores condições de conforto térmico e redução do consumo energético em tempos de mudanças climáticas.

Figura 18 - Esquema metodológico das simulações das tipologias construtivas para fins de elaboração de diretrizes construtivas



Fonte: a autora (2023)

4.1 ELABORAÇÃO DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS FUTUROS

O método *Morphing* tem sido amplamente empregado para realizar transformações matemáticas do clima atual para cenários climáticos futuros, considerando as projeções das mudanças climáticas. Esse método se fundamenta em modelos numéricos que representam os processos físicos que ocorrem na atmosfera, oceanos, criosfera e superfície terrestre, sendo conhecidos como Modelos de Circulação Geral (GCM) e Modelos Climáticos Regional (RCM) (Belcher, Hacker e Powell et al., 2005).

A ferramenta *Future Weather Generator* utiliza a metodologia *Morphing* para realizar projeções climáticas e apresenta mudanças mensais das variáveis climáticas. Esta ferramenta utiliza como base o GCM modelo EC-Earth3, que é parte do projeto CMIP6, sendo utilizado como base para o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC (2022). A ferramenta utiliza um período climático base para as prospecções um período de 1985 a 2014 e elabora arquivos climáticos futuros para 2050 (período de 2036-2065) e 2080 (período de 2066-2095) e para os cenários de emissões SSP2-4.5, SSP3-7.0, e SSP5-8.5, e apresenta como resultados arquivos climáticos futuros no formato EPW, amplamente utilizados em simulações de desempenho térmico e energético de edifícios e cidades.

Além disso, a ferramenta foi desenvolvida em linguagem de programação Java e seu código-fonte é disponibilizado gratuitamente sob a licença *Creative Commons Attribution 4.0 Share-Alike* (Rodrigues, Fernandes e Carvalho, 2023). Para tornar sua utilização mais acessível a simuladores e projetistas, os autores criaram uma interface gráfica que permite a inserção de arquivos climáticos históricos e, conseqüentemente, a geração de cenários climáticos futuros.

Nesta pesquisa, optou-se por utilizar o cenário SSP5-8.5, intitulado como “pessimista” pelo AR6 (IPCC, 2022), para as projeções de 2050 e 2080. Os arquivos climáticos base utilizando para as cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis consiste no *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) devido à sua maior concordância com o período histórico utilizado como base para as projeções, conforme indicado na documentação da ferramenta.

4.2 DEFINIÇÃO DAS ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE PROJETO PARA ADAPTAÇÃO DA HABITAÇÃO FRENTE AOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Na tipologia HISbase, foram inseridas propostas de intervenções construtivas com o objetivo de reduzir as horas em vulnerabilidade dos ocupantes no interior da edificação. Considerando que a cobertura e as paredes externas recebem radiação solar direta, resultando em maiores ganhos de calor, conforme descrito na análise do capítulo 3, esses elementos construtivos desempenham um papel crucial no desempenho termoenergético da habitação. Portanto, foram sugeridas as seguintes intervenções:

- i) Intervenções na envoltória da tipologia HISbase: esta intervenção consiste na inserção de poliestireno expandido (EPS) nas paredes externas e na cobertura, inserção de laje treliçada com preenchimento em lajota cerâmica, e com preenchimento de EPS, com o

objetivo de reduzir a transmitância térmica e aumentar a capacidade térmica. Os resultados obtidos dessas intervenções serão denominados como HISenv.

- ii) Implementação de dispositivos de sombreamento na tipologia HISenv: esta medida inclui a inserção de dispositivos de sombreamento do tipo brises nas janelas dos dormitórios e na sala. Os resultados obtidos dessas intervenções serão denominados como HISenv+bri.
- iii) Implementação do telhado verde na tipologia HISenv+bri: consiste em inserção de um telhado verde do tipo semi-intensivo, com aplicação de vegetação do tipo rasteira. O objetivo é investigar os efeitos da alta inércia térmica e o aumento da umidade devido às plantas. Os resultados obtidos dessas intervenções serão denominados como HISenv+bri+Tverde.

4.2.1 Intervenções na envoltória da tipologia HISbase

Foram definidos três tipos de coberturas e paredes externas, conforme detalhado na Tabela 27. Esses elementos foram parametrizados de maneira interdependente, resultando em um total de quinze configurações distintas, identificadas como “HISenv1” a “HISenv15”, conforme demonstrado na Tabela 28. A escolha dos sistemas construtivos se baseou na redução da transmitância e aumento da capacidade térmica, e em sistemas que seriam possíveis de implementação em projetos do tipo Minha Casa Minha Vida.

Essas intervenções têm como objetivo aprimorar a eficácia da envoltória em relação aos impactos das mudanças climáticas, sendo agrupadas sob a denominação “HISenv”. Vale ressaltar que as paredes internas não passaram por modificações, mantendo-se o sistema construtivo original da HISbase. Destaca-se que a resistência térmica da câmara de ar das tipologias é de $0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$, alta emissividade, espessura maior que 5cm.

Tabela 27 – Propriedades térmicas dos sistemas de vedação vertical e horizontal das intervenções

	Envoltória	Composição	Espessura (cm)	α	c (J/KgK)	λ (W/m.K)	ρ (Kg/m ³)	U (W/m ² K)	C _T (KJ/m ² K)
HISbase	Parede externa e interna	Argamassa interna e externa	2,50	0,30	1000	1,15	1800	2,37	151
		Bloco cerâmico	9,00	0,65	920	0,70	1000		
	Cobertura	Telha fibrocimento	0,80	0,30	840	0,65	1700	2,06	233
		Laje maciça	10,00	0,30	960	1,20	1300		
	Parbase	Composição HISbase						2,37	151
Paredes externas	Par1	Argamassa externa e interna	2,50	0,3	1000	1,15	1800	1,83	161
		Bloco cerâmico	14,00	0,65	920	0,70	1000		
	Par2	Argamassa interna	2,50	0,3	1000	1,15	1800	0,89	169,4
		Bloco cerâmico	9,00	0,65	920	0,70	1000		
		EPS	4,00	0,20	1420	0,04	35		
		Argamassa externa	2,50	0,3	1000	1,15	1800		
	Par3	Argamassa interna	2,50	0,3	1000	1,15	1800	0,90	259,8
		Bloco de concreto	14,00	0,65	1000	1,75	2400		
		EPS	4,00	0,20	1420	0,04	35		
		Argamassa externa	2,50	0,3	1000	1,15	1800		
	Cobbase	Composição HISbase							
Coberturas	Cob1	Telha cerâmica	1,00	0,65	920	0,70	1000	1,77	185
		Capa de concreto	4,00	0,65	1000	1,75	2400		
		Lajota de cerâmica	1,20	0,65	920	0,70	1000		
		Câmara de ar da lajota	4,60	-	-	0,565	-		
		Lajota de cerâmica	1,20	0,65	920	0,70	1000		
		Argamassa de acabamento	1,00	0,30	1000	1,15	1800		
	Cob2	Telha cerâmica	1,00	0,65	920	0,70	1000	1,26	150
		Capa de concreto	4,00	0,65	1000	1,75	2400		
		EPS	7,00	0,20	1420	0,04	35		
		Argamassa de acabamento	1,00	0,30	1000	1,15	1800		
	Cob3	Chapa metálica	0,06	0,30	460	55	7800	0,68	229
		EPS	4,00	0,20	1420	0,04	35		
		Chapa metálica	0,06	0,30	460	55	7800		
Laje maciça		10,00	0,30	960	1,20	1300			

Fonte: a autora (2023)

Tabela 28 – Abreviatura da parametrização das tipologias com as intervenções na envoltória

Tipologias	Envoltória	Tipologias	Envoltória
HISbase	HISbase	HISenv8	Par1+Cob2
HISenv1	Par1 + Cobbase	HISenv9	Par1 + Cob3
HISenv2	Par2 + Cobbase	HISenv10	Par2 + Cob1
HISenv3	Par3 + Cobbase	HISenv11	Par2 + Cob2
HISenv4	Parbase + Cob1	HISenv12	Par2+Cob3
HISenv5	Parbase + Cob2	HISenv13	Par3+Cob1
HISenv6	Parbase + Cob3	HISenv14	Par3+Cob2
HISenv7	Par1 + Cob1	HISenv15	Par3 + Cob3

Fonte: a autora (2023)

4.2.2 Implementação de dispositivos de sombreamento na tipologia HISenv

A partir da tipologia "HISenv", procedeu-se à implementação de dispositivos de sombreamento do tipo brises nas janelas. A escolha por utilizar brises baseou-se na capacidade intrínseca desses dispositivos de permitir a entrada de iluminação e ventilação natural, sem obstruir completamente as aberturas das janelas. Além disso, devido à sua característica fixa e integração à fachada, os brises não dependem da intervenção do usuário, assegurando sua eficácia durante todo o período de operação.

Para determinar as dimensões dos brises, foram utilizadas as cartas solares das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis, fornecidas pela ferramenta Analysis SOL-AR, versão 6.2 (LABEEE, 2023). As dimensões das aberturas das janelas seguiram o padrão da HISbase, conforme descrito no Apêndice A desta pesquisa. Os brises foram projetados para as janelas dos dormitórios e sala, sendo adaptados às particularidades da HISenv em cada região. O material escolhido para a fabricação dos brises foi o metálico, com uma espessura de 6mm.

Nesse contexto, no que diz respeito a Florianópolis, cuja região é caracterizada por um clima frio, foi decidido não considerar o período de inverno (22 de junho) para o dimensionamento dos brises. Em contrapartida, nas outras cidades, o sombreamento foi aplicado durante todas as estações do ano. Além disso, a janela da cozinha não foi contemplada com brises, uma vez que esse ambiente requer iluminação e ventilação naturais diretas e eficientes para seu funcionamento adequado.

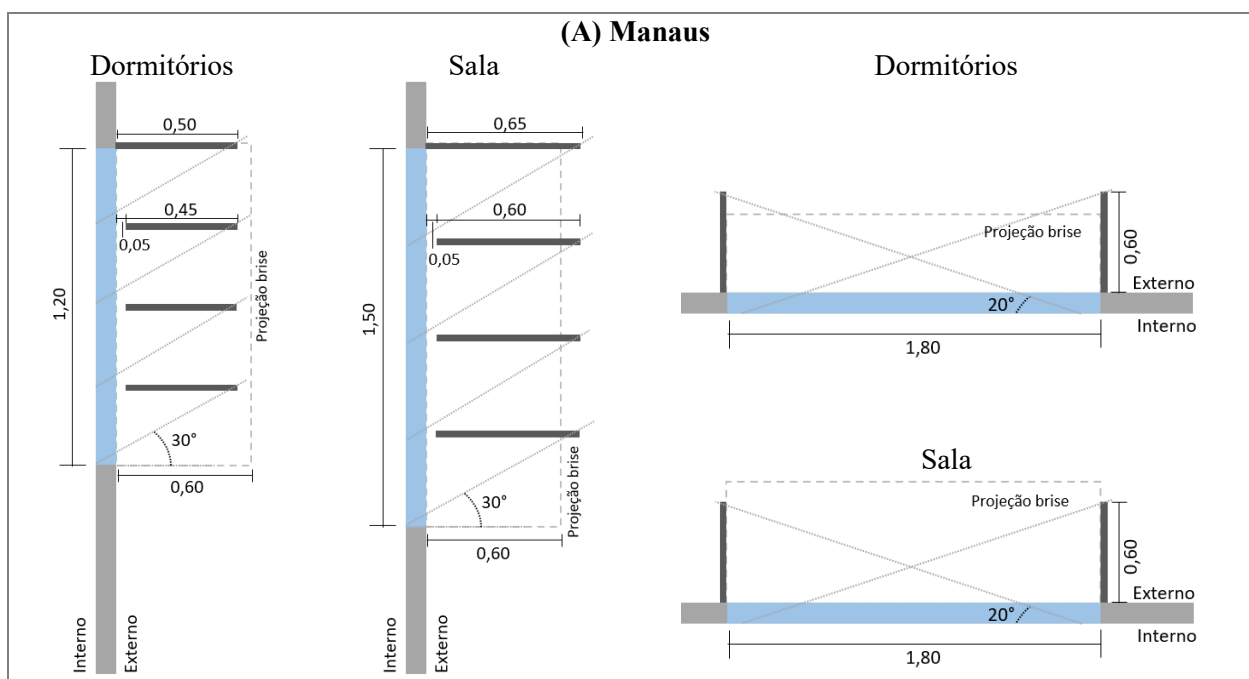
Dessa maneira, considerando que as janelas dos dormitórios e sala estão orientadas ao norte (0°), em Manaus, os brises foram configurados de maneira combinada, envolvendo a utilização de brises horizontais (ângulo α) e brises verticais (ângulos β_{dir} e β_{esq}). Para garantir um sombreamento completo nas janelas, o ângulo α foi ajustado para 30° , enquanto os ângulos β_{dir} e β_{esq} foram fixados em 20° . Com isso, os brises horizontais dos dormitórios e da sala possuem

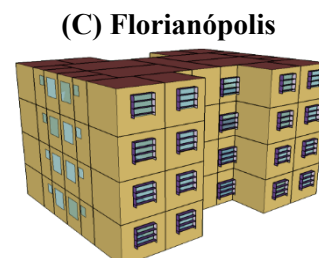
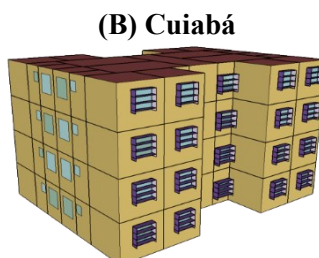
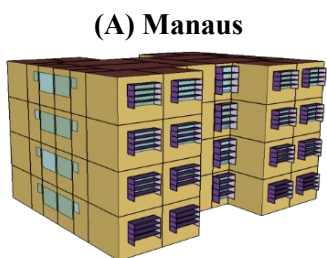
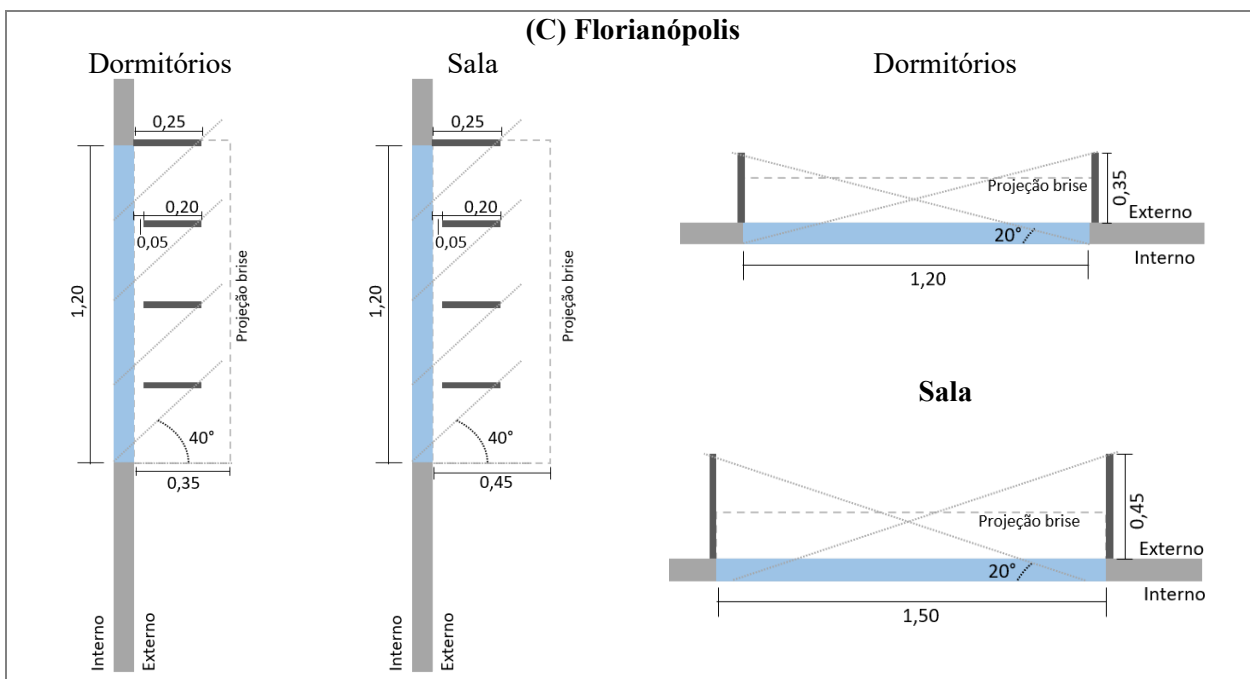
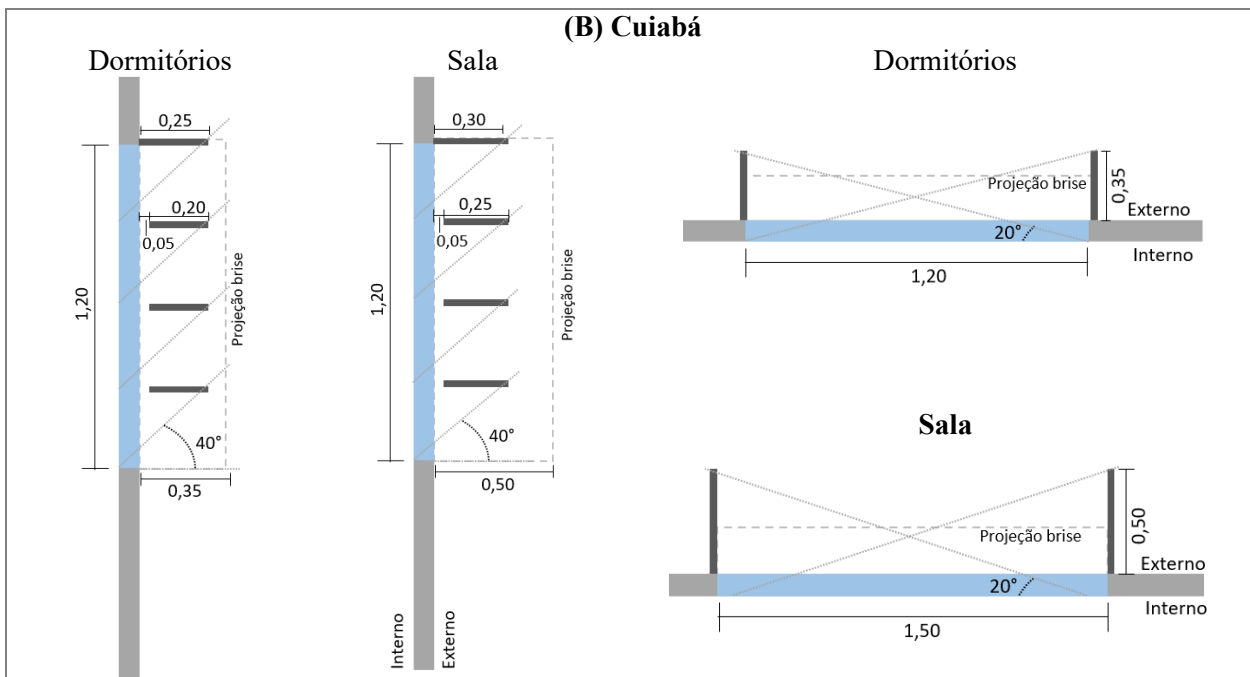
larguras de 0,50cm e 0,65cm, respectivamente, enquanto os brises verticais apresentam profundidades de 0,60cm (Figura 18-A).

Em Cuiabá, a fim de garantir um sombreamento total nas janelas dos dormitórios e da sala, optou-se por um ângulo α de 40° , combinado com ângulos β_{dir} e β_{esq} de 20° . Isso resultou em brises horizontais com largura de 0,25cm e 0,30cm, para os dormitórios e a sala, respectivamente, enquanto os brises verticais possuem profundidades de 0,35cm e 0,50cm, respectivamente (Figura 18-B). Por fim, em Florianópolis, desconsiderando o período de inverno, o ângulo α foi estabelecido em 45° , com ângulos β_{dir} e β_{esq} de 20° . Isso resultou em brises horizontais com larguras de 0,25cm para os dormitórios e sala, enquanto os brises verticais apresentam profundidades de 0,35cm e 0,45cm, respectivamente (Figura 18-C).

Nesse contexto, as habitações com os brises implementados foram denominadas como "HISenv+bri". É importante destacar que os brises foram incorporados à configuração "HISenv", ou seja, à habitação que já possui uma envoltória mais adequada em relação aos impactos das mudanças climáticas, sendo considerada no período histórico e futuros.

Figura 19 – Detalhamento dos brises dos dormitórios e sala da HISenv para cada região de estudo





Fonte: a autora (2023)

4.2.3 Implementação do telhado verde na tipologia HISenv+bri

A partir da tipologia HISenv+bri, implementou-se o telhado verde na cobertura da habitação, com o intuito de melhorar as condições internas dos ambientes. Conforme, Dias (2016) obteve-se reduções na carga térmica para resfriamento de 83% em Belém-PA e de 89% em Curitiba-PR com a utilização do telhado verde do tipo intensivo em comparação com um telhado convencional. Além disso, a modelagem de telhados vegetados permite simular os efeitos deste tipo de cobertura nas edificações frente a cenários climáticos futuros.

Neste contexto, definiu-se o telhado verde do tipo intensivo, o qual possui característica de espessura de substrato de 12 a 25cm, permite um tipo de vegetação de gramineas, arbustos e herbáceas, irrigação com uma necessidade mediana, com manutenção e custos médio, conforme Silva (2014). Além disso, o sistema do telhado vegetado simulado consiste na estrutura do telhado em laje, camada impermeabilizante, camada de drenagem, camada de filtro, substrato e vegetação.

Dessa maneira, a simulação do telhado vegetado se deu pelo módulo de cobertura verde desenvolvido por Sailor, que foi inserido ao EnergyPlus no *Input Material: Roof Vegetation* (Sailor, 2008; Silva, 2014). O modelo possibilita a simulação do balanço termoenergético da cobertura vegetada e traduz os efeitos da evapotranspiração, das trocas de radiação do substrato com a vegetação e do sombreamento. Além disso, permite explorar diversas características das camadas constituintes desse tipo de telhado, como a espessura do substrato e o tipo de vegetação empregada (Sailor, 2008). Portanto, os parâmetros inseridos na simulação são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Parâmetros do telhado verde inseridos na simulação computacional

Parâmetros referentes a vegetação – Input Material: Roof Vegetation	
Altura da planta	0,5m
Índice de área foliar (IAF)	2,5
Refletividade da folha	0,20
Emissividade da folha	0,95
Parâmetros referentes ao substrato – Input Material: Roof Vegetation	
Espessura	0,18m
Rugosidade do solo	Rugoso
Condutividade do solo seco	0,40W/m.K
Densidade do solo seco	641kg/m ³
Calor específico do solo seco	1100J/kg.K
Absortância térmica	0,95
Absortância solar	0,80
Absortância visível	0,70
Teor de umidade e saturação	0,40
Teor de umidade residual	0,01
Teor de umidade inicial	0,2
Método de cálculo de difusão da umidade	Simple

<i>Parâmetros referentes as camadas – Input: Material</i>			
	<i>Camada drenante</i>	<i>Camada filtrante</i>	<i>Camada impermeabilizante</i>
Espessura	0,06m	0,005m	0,007m
Calor específico	920J/kg.K	2500J/kg.K	1000J/kg.K
Densidade	800kg/m ³	160kg/m ³	2200kg/m ³
Condutividade	0,08W/m.K	0,06W/m.K	1,75W/m.K

Fonte: adaptado de Silva (2014)

Assim, o índice de área foliar (IAF) é o principal parâmetro que representa a abundância da vegetação da cobertura, portanto, utilizou-se o IAF de 2,5 que corresponde a espécies de gramíneas de porte mediano (Ascione et al., 2013). Dessa maneira, a instalação da cobertura verde foi sobre laje de concreto, totalizando transmitância térmica da composição do telhado vegetado é de 0,70W/m²K e a capacidade térmica de 450KJ/m²K.

Por fim, optou-se por ausência de irrigação mecânica, pelo fato do tipo do telhado vegetado não precisar de irrigação contínua e em resultar em uma maior influência sobre o desempenho da cobertura, abordagem semelhante foi realizada por Zinzi e Agnoli (2012), Dias (2016) e Menezes (2019). Portanto, o balanço hídrico da cobertura verde está sujeito à precipitação apresentada pelos arquivos climáticos e inserida no *Input Roofirrigation*.

As tipologias com o telhado verde implementados foram denominadas como "HISenv+bri+Tverde". Destaca-se que o telhado verde foi inserido na configuração "HISenv+bri", ou seja, a habitação que já possui uma envoltória mais adequada em relação aos impactos das mudanças climáticas e os dispositivos de sombreamento, sendo considerada no período histórico e futuros.

4.3 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES INTERNAS POR MEIO DA TEMPERATURA EFETIVA PADRÃO (SET)

Em cenários de ondas de calor e temperaturas elevadas, podem ocorrer eventos de superaquecimento nas edificações com diferentes intensidades e severidades, principalmente, nos ambientes que são ventilados naturalmente (Laouadi, Bartko e Lacasse, 2020). Para avaliar a vulnerabilidade dos ocupantes diante desses impactos, é necessário que a métrica de análise considere variáveis ambientais, tais como a Temperatura do Ar (°C), Umidade Relativa do Ar (%), Velocidade do Vento (m/s), associadas às variáveis humanas, como a Taxa Metabólica (Met) e as Vestimentas (clo). Além disso, os limites utilizados para quantificar as horas em vulnerabilidades devem levar em conta o estado fisiológico e a sensação térmica do ocupante.

A Temperatura Efetiva Padrão (SET) é um índice que leva em consideração quatro variáveis ambientais internas da edificação: Temperatura do Ar (TA em °C), Temperatura Radiante Média (TRM em °C), Umidade Relativa do Ar (UR em %) e Velocidade do Vento (V em m/s), além de duas variáveis relacionadas aos ocupantes, a Taxa Metabólica (Met) e as Vestimentas (clo). Esse índice possibilita a avaliação das condições térmicas enfrentadas pelos ocupantes em um determinado ambiente, tornando-se um indicador relevante de vulnerabilidade. O modelo utilizado para desenvolver o índice é baseado em um modelo dinâmico de dois nós proposto por Gagge et al. (1971), o qual prevê a resposta fisiológica dinâmica do corpo humano quando exposto a condições térmicas estressantes, cujo cálculo da temperatura efetiva está descrito na ASHRAE 1976 e em Du e Yang (2020) e apresentando no item 2.3.2 desta pesquisa.

A partir deste índice, é possível realizar as seguintes investigações, conforme metodologia descrita por Laouadi, Bartko e Lacasse (2020):

- i) Severidade (SEV_{total}): refere-se à magnitude de um evento de calor durante a exposição diurna (SEV_D) e noturna (SEV_N), em relação ao limite neutro (Equação 9);
- ii) Intensidade (I): consiste na razão entre a severidade e duração de um evento de calor que ocorre durante a exposição diurna (I_D) e noturna (I_N), ou seja, indica o desvio médio em relação ao limite neutro (Equação 10);
- iii) Horas em Vulnerabilidade ($H_{v_{uln}}$): refere-se às horas excedentes aos limites de neutro, ligeiramente quente, alerta e emergência. Estes limites estão associados às sensações térmicas específicas, a saber: neutra, leve sudorese, média sudorese e profunda sudorese (que indica risco de falha na termorregulação), respectivamente.

$$SEV_{total} = \sum s (SET_N + SET_D) \quad \text{Equação 9}$$

$$SEV_D = \sum n (SET_t - SET_{Ld}) \quad \text{Equação 10}$$

$$SEV_N = \sum n (SET_t - SET_{Ln}) \quad \text{Equação 11}$$

$$I_{D \text{ ou } N} = \frac{SEV_{D \text{ ou } N}}{P_{D \text{ ou } N}} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

SEV_{total} : Severidade total de um evento de superaquecimento interno (°C.h)

$SEV_{D \text{ ou } N}$: Severidade de um evento de superaquecimento interno durante a exposição noturna e/ou diurna (°C.h)

$SET_{Ld \text{ ou } Ln}$: Temperatura de SET limite para um ocupante durante exposição noturna e/ou diurna (°C)

SET_t : Valor horário de SET durante a exposição diurna e/ou noturna (°C)

$I_{N \text{ ou } D}$: Intensidade de um evento de superaquecimento interno durante a exposição noturna e/ou diurna (°C)

$P_{D \text{ ou } N}$: Período de exposição diurna e/ou noturna (horas)





Neste contexto, para avaliar as condições internas em termos de severidade, intensidade e horas em vulnerabilidade, obtiveram-se as variáveis ambientais internas da edificação, incluindo TA, TRM e UR, por meio das simulações computacionais na condição naturalmente ventiladas. Essas simulações consideraram os ambientes de permanência prolongada (dormitórios e sala/cozinha), e a velocidade do vento foi fixada em 0,10m/s. O SET foi calculado utilizando as rotinas disponíveis gratuitamente no pacote *Pythermalcomfort*, em linguagem Phyton (Tartarini, Schiavon e Mackey, 2019).

A exposição dos ocupantes foi considerada em dois períodos e nos ambientes sala/cozinha e dormitórios, conforme os padrões de ocupação estabelecidos pela NBR 15.575 (ABNT, 2021). No ambiente sala/cozinha, os períodos diurno e noturno foram definidos das 14:59h às 17:59h e das 17:59h às 21:59h, respectivamente. Nos dormitórios, os períodos de exposição foram das 05:59h às 07:59h e das 22:59h às 05:59h. Portanto, a exposição diurna consistiu em 2.190 horas, enquanto a exposição noturna totalizou 4.380 horas.

Os ocupantes foram considerados com vestimentas específicas, utilizando calça e camisa manga curta no período diurno e pijamas (grosso - 0,57clo) no período noturno, de acordo com a NBR16.401 (ABNT, 2021). A atividade metabólica foi definida como sentado ou assistindo TV (1,0Met – 60W/m²) e dormindo ou descansando (0,8Met – 45W/m²), conforme NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Os limites adotados para a análise da Severidade (SEV) e Intensidade (I), foram adotados de $SET \leq 26,0^{\circ}C$, o que corresponde a uma resposta fisiológica e sensação térmica “neutra” dos ocupantes, conforme Parson (2014). Para quantificar das Horas em Vulnerabilidade (Hv_{vuln}) foi realizada considerando os limites que variam de “neutro” a “emergência”, de acordo com a escala apresentada por Parson (2014) e calculadas como a porcentagem de horas de exposição diurna e/ou noturna em cada um desses limites. Isso resultou nas horas em vulnerabilidade dos ocupantes em cada ambiente de permanência prolongada (Tabela 30).

Tabela 30 - Limites de resposta fisiológica e sensação térmica ao calor dos ocupantes em diferentes faixas de SET

Limites	Sensação térmica	
Neutro $\leq 26^{\circ}\text{C}$	Neutro	
$\geq 26^{\circ}\text{C}$ Ligeiramente quente $<30,0^{\circ}\text{C}$	Sudorese leve	
$\geq 30^{\circ}\text{C}$ Alerta $<35,0^{\circ}\text{C}$	Sudorese média	
Emergência $\geq 35,0^{\circ}$	Sudorese profunda, risco de falha na termorregulação	

Fonte: adaptado de Parson (2014)

De posse das simulações computacionais na condição naturalmente ventilada da HISbase, HISenv, HISenv+bri e HISenv+bri+Tverde, calculou-se o SET a partir da rotina do *Pythermalcomfort* e investigou a Severidade, Intensidade e Horas em Vulnerabilidade. A análise dos resultados consistiu no cômputo dos resultados por média ponderada pela área dos ambientes de permanência prolongada (dormitórios e sala/cozinha), para fins de comparação e investigação da capacidade adaptativa com diferentes sistemas de envoltória e estratégias passivas de projeto, para o período histórico e cenários climáticos futuros (2050 e 2080).

4.4 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO DO AR-CONDICIONADO E CONSUMO ENERGÉTICO NO PERÍODO HISTÓRICO E FUTUROS

Com os impactos das mudanças climáticas, os equipamentos de ar-condicionado projetados e utilizados, atualmente, podem ter sua eficiência comprometida, principalmente, em função do aumento das temperaturas. Dessa maneira, primeiramente, realizou-se uma investigação por meio de simulação computacional das capacidades de resfriamento e aquecimento necessárias para as tipologias HISbase e da tipologia com a melhoria da envoltória e a implementação das estratégias passivas de projeto, a HISenv+bri+Tverde, no período histórico e cenários climáticos futuros.

Para a aplicação e desenvolvimento desta metodologia, utilizou-se o procedimento de simulação descrito no item 3.1.3 desta pesquisa. Além disso, a NBR 15.575 (ABNT, 2021) relata que, para simulações de edificações condicionadas artificialmente, o sistema deve ser acionado considerando a ocorrência de ocupação dos ambientes de permanência prolongada (APP).

O sistema de ar-condicionado utilizado nos APP das tipologias é do tipo *Split*, com Coeficiente de Performance de 3,23, sendo modelado no input: *HVACTemplate:System:Unitary*, e

o input *Cooling Coil Gross Rated Capacity* e *Heating Coil Capacity* foi definido como “autosize”. Ressalta-se que o sistema utilizado não se trata de um modelo inverter de *Split*.

Os valores foram obtidos através do output: *Cooling Coil Total Cooling Rate* (em W), que quantifica a capacidade do sistema de resfriamento, e do output: *Heating Coil Total Heating Rate* (em W), que representa a capacidade de aquecimento. A definição deste input também envolve a configuração dos termostatos para aquecimento e resfriamento, pelo input *HVACTemplate: Thermostat*.

Assim, optou-se por utilizar os termostatos de 23,0°C para resfriamento e de 21,0°C para aquecimento, conforme a NBR 15.575 (ABNT, 2021). Além disso, com o objetivo de estabelecer um termostato baseado no limite de neutralidade térmica ($SET \leq 26,0^\circ\text{C}$), foi realizada uma correlação entre a temperatura interna do ar e a temperatura efetiva padrão, obtida conforme o item 4.3 desta pesquisa.

Essa correlação consiste na filtragem da temperatura do ar interna de cada APP da tipologia HISenv+bri+Tverde, que corresponde a $SET \leq 26,0^\circ\text{C}$ (neutro). Assim, os valores dos termostatos para resfriamento obtidos foram estabelecidos de 24,8°C em Manaus, de 23,0°C em Cuiabá e de 21,3°C em Florianópolis. Para obter um único valor de termostato de resfriamento aplicável às três cidades analisadas, definiu-se o valor de 25,0°C. O termostato de aquecimento foi mantido em 21,0°C para Florianópolis, seguindo a metodologia da NBR 15.575 (ABNT, 2021). Neste contexto, foram definidos três cenários de análise da capacidade de resfriamento e do consumo energético do sistema de ar-condicionado:

- i) HISbase_AC23: Tipologia HISbase com sistema de ar-condicionado do tipo *Split*, COP 3,23 e termostato de 23,0°C para resfriamento nas três cidades e 21,0°C para aquecimento em Florianópolis;
- ii) HISenv+bri+Tverde_AC23: Tipologia HISenv+bri+Tverde com sistema de ar-condicionado do tipo *Split*, COP 3,23 e termostato de 23,0°C para resfriamento nas três cidades e 21,0°C para aquecimento em Florianópolis;
- iii) HISenv+bri+Tverde_AC25: Tipologia HISenv+bri+Tverde com sistema de ar-condicionado do tipo *Split*, COP 3,23 e termostato de 25,0°C para resfriamento nas três cidades e 21,0°C para aquecimento em Florianópolis;

Os resultados obtidos das capacidades de resfriamento e de aquecimento do sistema foram ajustados de forma a atender as temperaturas dos termostatos em 98% das horas ocupadas de cada APP, conforme recomendação da NBR 16.401 (ABNT, 2021) no período histórico e 2050 e 2080.

De posse desses resultados foram identificadas as maiores capacidades do sistema de resfriamento necessárias nos dormitórios e na sala/cozinha, visando dimensionar um sistema de condicionamento de ar capaz de atender aos dois períodos de exposição dos ocupantes em cada período e cidade de análise. Essa capacidade de resfriamento e/ou aquecimento foram inseridas no Input *Cooling Coil Gross Rated Capacity* e *Heating Coil Capacity*, para as simulações do consumo energético nas tipologias.

A estimativa do consumo energético de resfriamento e/ou aquecimento do sistema de ar-condicionado foram baseados no método de simulação da tipologia na condição condicionada artificialmente da NBR 15.575 (ABNT, 2021). O método apresenta que o sistema de resfriamento e/ou aquecimento deve ser acionado nos períodos de ocupação dos ambientes de permanência prolongada. Portanto, considerou-se nesta pesquisa o perfil de operação do sistema de ar-condicionado, conforme a ocupação dos dormitórios 1 e 2, e da sala e cozinha (conjugada).

Além disso, foram considerados o consumo energético de iluminação e equipamentos conforme densidades de potência estabelecidos conforme a NBR 15.575 (ABNT, 2021), ambos descritos no estudo piloto desta pesquisa. Os resultados foram quantificados em kWh/ano de cada tipologia e cenário analisado, considerando o consumo do sistema de ar-condicionado, para os períodos históricos e 2050 e 2080.

4.4.1 Prognóstico das emissões de dióxido de carbono por meio do consumo energético das tipologias no período histórico e futuros (2050 e 2080)

A estimativa das emissões de dióxido de carbono para as tipologias HISbase e HISenv6+bri+Tverde baseou-se no consumo energético total, que inclui o consumo de iluminação, equipamentos, resfriamento e aquecimento, nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis, dos três períodos de análise. Destaca-se que foram investigados os três cenários definidos no subtópico anterior desta pesquisa: HISbase_AC23, HISenv6+bri+Tverde_AC23 e HISenv6+bri+Tverde_AC25.

Para essa estimativa foi utilizado como referência o método descrito na Instrução Normativa Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INIR), a qual determina a emissão total de dióxido de carbono (E_{CO_2}) provenientes dos sistemas das edificações multifamiliares, considerando os consumos do condicionamento de ar, aquecimento de água, equipamentos e geração local de energia renovável, multiplicados pelos seus devidos fatores

de emissões (Brasil, 2021). Desse modo, é possível determinar as emissões de dióxido de carbono (CO₂), conforme a Equação 13.

$$E_{CO_2} = \frac{C_{EE} \times fe_E}{1000} \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

E_{CO_2} : emissão total de dióxido de carbono da habitação (tCO₂/ano)

C_{EE} : consumo total de energia elétrica da habitação (kWh/ano)

fe_E : fator de emissão de dióxido de carbono na geração de energia elétrica (kg.CO₂/kWh)

Os fatores de emissões de dióxido de carbono por geração de eletricidade se diferenciam em Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistemas Isolados (SIs). A maior parte do território brasileiro tem seu fornecimento de eletricidade proveniente do SIN, com predominância de usinas hidrelétricas e constituído de quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e maior parte da região Norte. No entanto, algumas localidades, como Fernando de Noronha e algumas cidades ao Norte do estado do Mato Grosso, são abastecidas por SIs, não interligados às principais redes de eletricidade do Brasil, em que a eletricidade é fornecida muitas vezes por geradores movidos a diesel, biodiesel e gás natural (CB3E, 2020).

Considerando as regiões de estudos, utilizou-se como referência de fator de emissão de dióxido de carbono por geração de eletricidade oriunda do SIN, sendo de 0,090tCO₂/MWh, conforme apresentado no relatório intitulado “Fatores de conversão de energia elétrica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações” (CB3E, 2020). Por fim, o fator de emissão de dióxido de carbono considerado foi de 0,090tCO₂/MWh foi considerado no período histórico e nas projeções climáticas de 2050 e 2080, como um indicador de emissões de dióxido de carbono do consumo energético das tipologias, devido a limitação de fatores previstos para cenários climáticos futuros para edificações residenciais. Os resultados foram quantificados em tCO₂/ano.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS PERFIS CLIMÁTICOS DAS REGIÕES DE ESTUDO

Após a execução dos procedimentos da ferramenta *Future Weather Generator*, que representa a primeira etapa metodológica desta pesquisa, foram obtidos os arquivos climáticos no formato EPW para as cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis, referentes às duas projeções analisadas (2050 e 2080). A partir desses arquivos, foram analisadas as variáveis climáticas Temperatura de Bulbo Seco (TBS, em °C), Umidade Relativa do Ar (UR, em %) e Radiação Global Horizontal (Wh/m²).

Em relação às temperaturas médias anuais em Manaus, Cuiabá e Florianópolis, observa-se um aumento de +2,45°C em 2050 e de +4,81°C em 2080 em relação ao período histórico (26,80°C, 26,73°C e 20,75°C), respectivamente (Figura 19). Esse aumento está associado à projeção climática apresentada no sexto relatório do IPCC, bem como ao modelo utilizado pela ferramenta para a elaboração dos cenários climáticos futuros. É importante ressaltar que o impacto das mudanças climáticas na variação de temperatura e umidade relativa do ar apresenta é específico, dependendo das características climatológicas distintas de cada região.

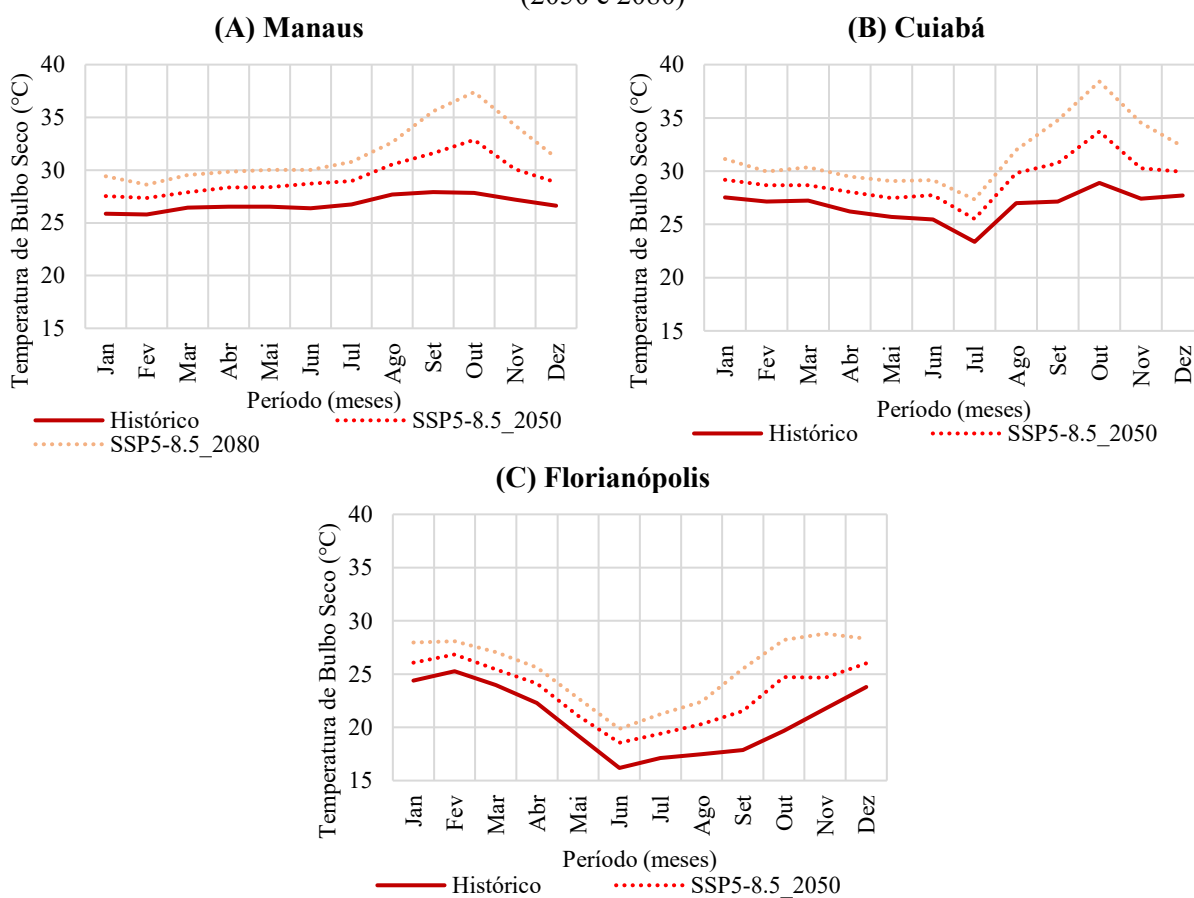
Em Manaus, no período histórico, o mês caracterizado como o mais quente é setembro, com temperaturas médias mensais em torno de 27,91°C. No entanto, com o impacto das mudanças climáticas nos cenários de 2050 e 2080, outubro se torna o mês mais quente, com temperaturas médias mensais de 32,86°C e de 37,38°C, apresentando aumentos de +4,95°C e de +7,47°C, respectivamente, em relação ao período histórico do setembro (Figura 19-A). Junho, por outro lado, é o mês com temperaturas mais amenas, com médias mensais no período histórico de 26,39°C, em 2050 de 28,71°C e em 2080 de 30,03°C (Figura 19-A).

Em Cuiabá, o mês caracterizado mais quente no período histórico e nos cenários futuros também é outubro, com uma média mensal de 28,89°C, aumentando para 33,72°C (+4,83°C) em 2050 e para 38,42°C (+9,53°C) em 2080 (Figura 19-B). O mês de julho apresenta temperaturas mais amenas em Cuiabá, com médias mensais de 23,36°C no período histórico, 25,52°C em 2050 e 27,35°C em 2080 (Figura 19-B).

Em Florianópolis, o mês mais quente é fevereiro no período histórico e, em 2050 e 2080, com uma média mensal de 25,27°C, 26,84°C (+1,57°C) e 28,10°C (+2,83°C), respectivamente (Figura 19-C). Junho é caracterizado por apresentar temperaturas mais amenas, com médias mensais de 16,19°C no período histórico, 18,56°C em 2050 e 19,86°C em 2080.

Observa-se que os maiores aumentos nas temperaturas dos meses mais quentes ocorreram em cidades com climas quentes, como Manaus e Cuiabá. Entretanto, é importante destacar que no cenário de 2080, Cuiabá apresenta um aumento de quase $10,0^{\circ}\text{C}$, o que pode ser justificado pela combinação de ser uma região de clima quente e de baixa umidade relativa do ar nesse mês. Além disso, destaca-se que mesmo nos meses de clima mais ameno, o impacto das mudanças climáticas aumenta as temperaturas em torno de $+3,75^{\circ}\text{C}$ nas regiões de estudo, tornando o período de inverno mais quente.

Figura 20 – Temperatura média de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$) em médias mensais no período histórico e futuros (2050 e 2080)



Fonte: a autora (2023)

Em relação às temperaturas máximas, a média anual em Manaus, Cuiabá e Florianópolis no período histórico é de $33,83^{\circ}\text{C}$, $36,74^{\circ}\text{C}$ e $30,14^{\circ}\text{C}$, enquanto as temperaturas mínimas são de $21,53^{\circ}\text{C}$, $16,58^{\circ}\text{C}$ e $12,45^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Com o impacto das mudanças climáticas, esses valores aumentam em cerca de $+4,25^{\circ}\text{C}$ em 2050 e de $+5,27^{\circ}\text{C}$ em 2080 para as cidades em análise.

Em Manaus, a temperatura máxima no mês de novembro ultrapassa $41,0^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura mínima aumenta cerca de $+4,80^{\circ}\text{C}$ no mês de julho (Tabela 31). Em Cuiabá, esse comportamento é semelhante, no entanto, no período histórico, a temperatura máxima no mês de

outubro é de 41,0°C, enquanto, em 2080, a temperatura ultrapassa 51,0°C (Tabela 31). Em Florianópolis, os meses de setembro a fevereiro apresentam as temperaturas máximas mais altas, com destaque para outubro, que apresenta uma temperatura máxima mensal de 38,10°C (Tabela 31). Esses resultados evidenciam o impacto significativo das mudanças climáticas nas temperaturas máximas das três cidades estudadas, representando um desafio para a adaptação no ambiente construído e, principalmente, para a saúde dos ocupantes.

Tabela 31 - Temperatura de bulbo seco máxima e mínima mensal (°C) no período histórico e futuros (2050 e 2080)

(A) Manaus													
		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TBSmáx	Histórico	32,6	32,1	33,8	33,0	32,4	33,2	33,6	34,6	35,8	34,8	34,8	35,2
	2050	33,6	32,5	34,6	34,4	33,8	34,5	35,7	37,6	40,1	40,4	37,2	37,0
	2080	35,3	33,5	36,0	35,2	34,5	35,2	36,7	39,3	45,1	45,1	41,6	39,0
TBSmín	Histórico	21,7	22,0	22,3	21,5	22,7	21,3	20,9	21,5	20,6	22,7	20,2	21,0
	2050	23,8	24,3	24,1	23,7	24,8	24,4	23,3	24,2	23,7	27,3	23,6	23,5
	2080	25,8	25,7	25,9	25,7	27,0	26,2	25,7	26,6	26,7	31,7	27,4	26,0
(B) Cuiabá													
		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TBSmáx	Histórico	35,8	35,7	35,8	35,0	37,0	35,6	35,0	40,0	39,0	41,0	36,0	35,0
	2050	36,8	36,4	36,7	36,4	38,5	37,1	37,0	43,1	43,1	46,5	38,2	36,8
	2080	38,7	37,5	38,2	37,3	39,4	38,0	38,2	44,8	48,0	51,6	42,9	39,1
TBSmín	Histórico	21,6	19,7	20,0	15,8	12,0	16,5	9,3	13,0	13,3	17,7	19,0	21,0
	2050	23,7	22,0	21,9	18,1	14,1	19,5	11,7	15,5	16,4	21,9	22,5	23,6
	2080	25,7	23,5	23,8	20,2	16,6	21,3	14,2	18,2	19,3	26,2	26,3	26,1
(C) Florianópolis													
		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TBSmáx	Histórico	33,0	34,0	32,0	28,4	30,0	27,0	31,4	29,7	28,0	27,6	30,0	30,6
	2050	34,0	34,5	32,9	29,8	31,4	28,2	33,3	32,9	32,3	33,3	32,4	32,5
	2080	35,8	35,4	34,2	30,7	32,1	28,7	33,5	34,2	37,4	38,1	36,8	34,6
TBSmín	Histórico	18,0	16,0	16,0	15,4	10,0	5,0	9,0	10,4	9,0	11,0	13,0	16,6
	2050	20,2	18,7	18,1	17,7	12,3	8,6	11,5	13,0	12,1	15,3	16,5	19,2
	2080	22,1	20,4	20,0	19,9	14,7	10,7	14,2	15,6	15,1	19,5	20,3	21,7

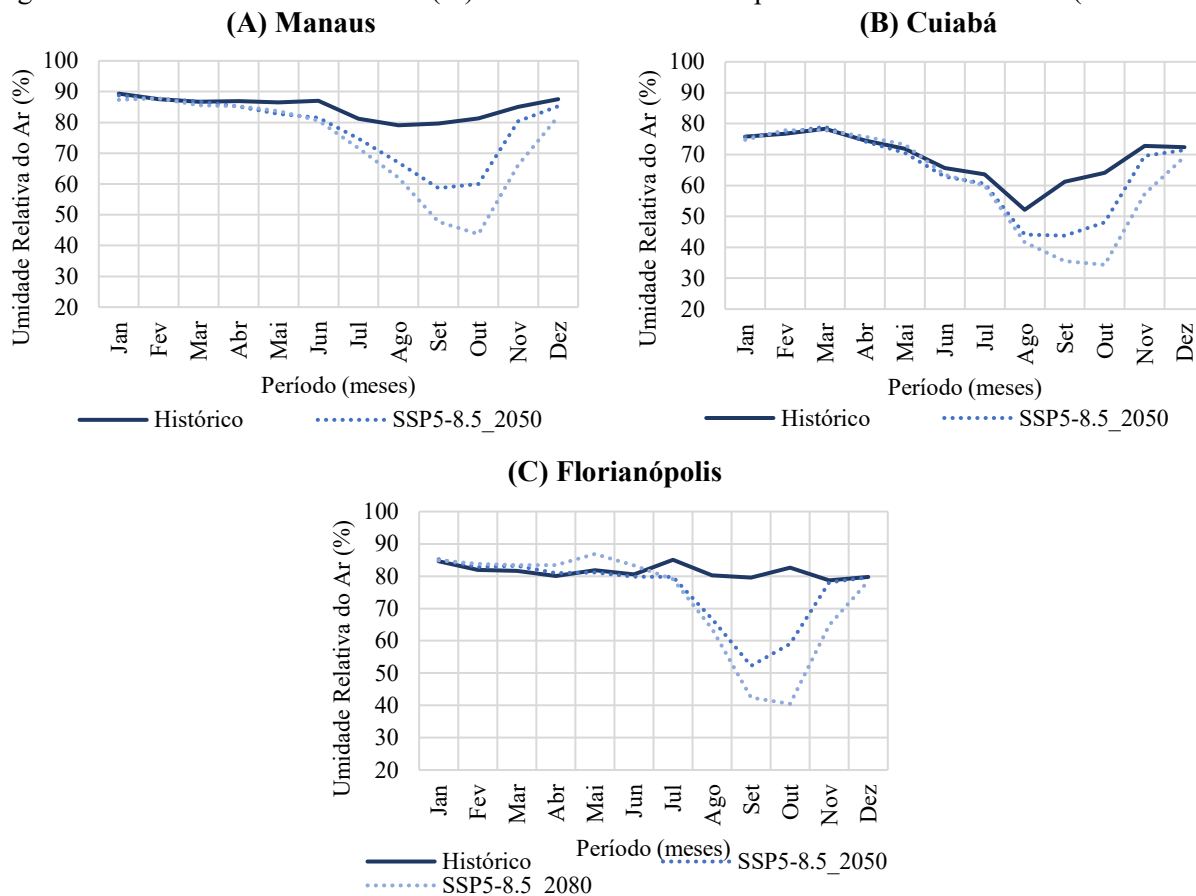
Fonte: a autora (2023)

Em função do aumento da temperatura do ar, a umidade relativa média anual sofre reduções no período histórico em Manaus, Cuiabá e Florianópolis, sendo de 84,83%, 69,08% e 81,37%, respectivamente (Figura 20). Essas reduções são de aproximadamente -11,21%, -7,34% e -8,49% em 2080, respectivamente. Observa-se que, em todas as cidades analisadas, a partir do mês de julho, há uma redução na umidade relativa do ar, podendo ser justificado pelo período em que a temperatura do ar aumenta.

Ao correlacionar a temperatura do ar com a umidade relativa, observa-se que, em outubro, o mês mais quente em Manaus em 2080, a temperatura média do ar é de 37,38°C, e a umidade relativa é de 43,72%. Em Cuiabá e Florianópolis, esse comportamento se repete no mesmo mês, com temperatura do ar de 38,42°C e 28,21°C, e umidade relativa de 34,33% e 40,48%,

respectivamente. O aumento da temperatura do ar e a redução da umidade relativa podem impactar negativamente a saúde dos ocupantes das edificações, aumentando o estresse térmico, o risco de desidratação, problemas cardíacos e até mesmo a mortalidade.

Figura 21 – Umidade Relativa do Ar (%) em médias mensais no período histórico e futuros (2050 e 2080)



Fonte: a autora (2023)

Em relação à umidade relativa máxima, em todas as cidades analisadas durante o período histórico, os valores alcançaram 100% ao longo de todos os meses do ano. No entanto, com as alterações climáticas em Manaus e Cuiabá, no período de 2080, esses valores reduzem para 54% e 53% em outubro, respectivamente, enquanto em Florianópolis, essa redução chega a 51% em outubro (Tabela 32). A umidade relativa mínima não ultrapassa 65% em Manaus, 50% em Cuiabá e 52% em Florianópolis em todos os períodos e meses analisados.

Tabela 32 – Umidade relativa máxima e mínima mensal (%) no período histórico e futuros (2050 e 2080)

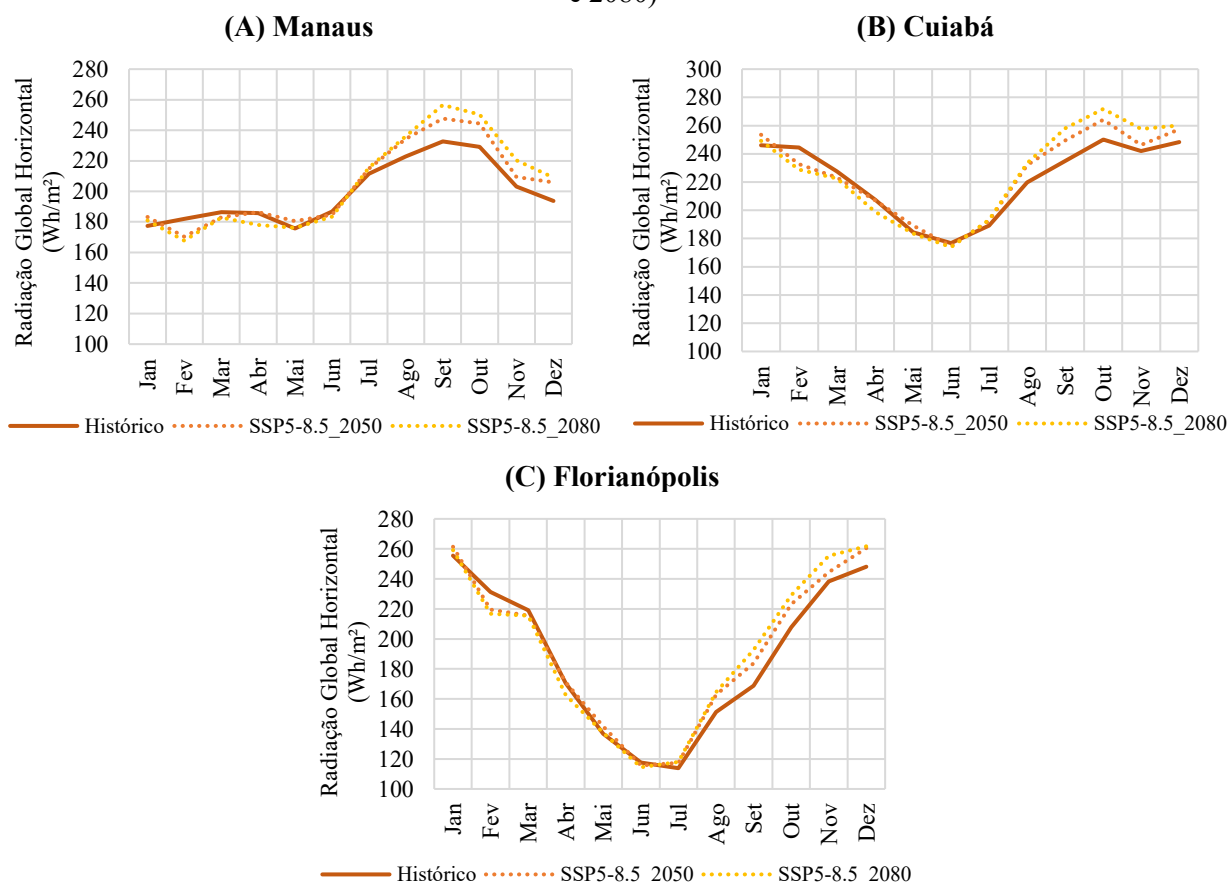
(A) Manaus													
		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
URmáx	Histórico	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	2050	98	99	99	97	95	92	91	85	75	74	94	97
	2080	97	98	97	96	94	89	86	77	62	54	78	94
URmín	Histórico	60	59	52	63	59	49	49	50	51	50	52	51
	2050	62	63	55	63	58	50	46	42	35	36	51	51
	2080	62	65	56	66	62	52	47	40	29	26	42	51
(B) Cuiabá													
		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
URmáx	Histórico	100	100	100	100	100	100	100	95	98	100	100	100
	2050	98	98	100	98	100	92	96	81	72	76	93	97
	2080	96	99	98	98	100	91	94	74	59	53	77	93
URmín	Histórico	46	34	47	38	30	27	21	13	17	18	31	42
	2050	48	37	49	40	31	28	22	11	10	13	34	43
	2080	48	39	50	43	36	30	24	11	8	9	28	43
(C) Florianópolis													
		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
URmáx	Histórico	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	2050	100	99	100	99	100	97	94	83	70	72	99	99
	2080	100	99	100	100	100	99	91	78	56	51	83	98
URmín	Histórico	49	36	46	37	33	31	50	30	34	31	24	48
	2050	52	41	50	41	37	39	48	25	16	21	30	50
	2080	53	43	51	46	45	45	51	26	14	13	26	51

Fonte: a autora (2023)

Na radiação solar, o impacto das emissões de gases de efeito estufa provocou aumento de +2,93% em Manaus, +2,26% em Cuiabá e +3,04% em Florianópolis na média anual da radiação global horizontal em 2080, em comparação com o período histórico. Assim, em Manaus, Cuiabá e Florianópolis a radiação solar média anual no período histórico é de 198,9Wh/m², 222,5Wh/m² e 188,2Wh/m², passando para 204,7Wh/m², 227,5Wh/m² e 193,9Wh/m² em 2080, respectivamente.

O aumento da radiação global horizontal relativamente baixo, em relação às demais variáveis climáticas analisadas. No entanto, destaca-se que os maiores valores de radiação ocorrem nos meses mais quentes nas cidades analisadas. Neste contexto, em Manaus e Cuiabá o mês de outubro apresenta os maiores valores de radiação global horizontal, sendo de 229,2Wh/m² e 250,1Wh/m² no período histórico, aumentando em +9,1% e +8,7%, respectivamente. Em Florianópolis, os maiores valores são no mês de janeiro, o qual apresenta no período histórico radiação global horizontal de 255,5Wh/m² passando para 259,2Wh/m², aumento de +1,5% (Figura 21).

Figura 22 – Radiação Global Horizontal (Wh/m^2) em médias mensais no período histórico e futuros (2050 e 2080)



Fonte: a autora (2023)

Em síntese, as projeções climáticas de 2050 e 2080 indicam um aumento significativo da temperatura do ar, acompanhado por uma tendência de redução na umidade relativa em todas as cidades analisadas. Em 2080, a umidade relativa diminui cerca de -11,21% em Manaus, -7,34% em Cuiabá e -8,50% em Florianópolis em relação ao período histórico. Além disso, destaca-se que a radiação global horizontal aumenta em torno de $+4,5\text{Wh/m}^2$ em 2050 e $+5,5\text{Wh/m}^2$ em 2080, em média para as três cidades analisadas, em comparação com o período histórico (Tabela 33). Essas projeções são alarmantes, pois a combinação de altas temperaturas e baixa umidade relativa pode favorecer a ocorrência de um clima extremamente quente, aumentando os riscos para a saúde humana.

Tabela 33 – Média anual de Temperatura de Bulbo Seco (em °C), Umidade Relativa do Ar (em %) e Radiação Global Horizontal (em Wh/m²) no período histórico e projeções climáticas.

Temperatura de Bulbo Seco (°C)			
	Manaus	Cuiabá	Florianópolis
Histórico	26,80°C	26,73°C	20,75°C
2050	29,26°C (+2,46°C)	29,15°C (+2,42°C)	23,23°C (+2,48°C)
2080	31,60°C (+4,81°C)	31,54°C (+4,81°C)	25,49°C (+4,73°C)
Umidade Relativa (%)			
	Manaus	Cuiabá	Florianópolis
Histórico	84,83%	69,08%	81,37%
2050	78,22% (-6,61%)	64,76% (-4,32%)	75,74% (-5,63%)
2080	73,62% (-11,21%)	61,74% (-7,34%)	72,88% (-8,50%)
Radiação Global Horizontal (Wh/m²)			
	Manaus	Cuiabá	Florianópolis
Histórico	198,9	222,5	188,2
2050	203,7 (+4,80Wh/m ²)	226,8 (+4,30Wh/m ²)	193,1 (+4,90Wh/m ²)
2080	204,7 (+5,80Wh/m ²)	227,5 (+5,00Wh/m ²)	193,9 (+5,70Wh/m ²)

Fonte: a autora (2023)

O aumento na temperatura média do ar pode ser observado também nos estudos de Triana; Lamberts e Sassi (2018), para a cidade de São Paulo e Salvador, para o cenário de 2050, que utilizou metodologia *morphing*, modelo climático HadCM3 e cenário de emissão A2 do IPCC. Os autores obtiveram aumento das temperaturas médias do ar em +3°C, para ambas as cidades, principalmente, entre os meses de setembro e outubro, do cenário base para o cenário de 2050. Essas condições também são encontradas no trabalho de Alves (2019), para a cidade de São Paulo.

Dos estudos de Rodrigues, Fernandes e Carvalho (2023), que utilizaram a ferramenta Future Weather Generator, o cenário SSP5-8.5 do AR6 do IPCC, afirmam que as temperaturas médias anuais do ar aumentarão em +2,7°C em 2050 e +4,6°C em 2080 para Coimbra em Portugal. Além disso, os autores destacam que a umidade relativa do ar reduz em -5,6% em 2080, em comparação com o período histórico. Rubio-Bellido; Pérez-Fargallo e Pullido-Arcas (2016) investigaram também a radiação global horizontal e encontraram um aumento médio de +8,48Wh/m² em todas as zonas bioclimáticas do Chile em 2080. Dos estudos de Yildiz (2015), em três cidades da Turquia, conclui-se que a temperatura média anual e a radiação global horizontal média anual aumentarão 4°C e 7W/m², respectivamente, e a umidade relativa do ar média anual reduzirá 10%, até o cenário de 2080, se comparados ao período histórico.

Esses resultados corroboram com os encontrados neste trabalho, apresentando diferenças relativamente pequenas, podendo ser justificada pelo cenário de emissões utilizado e região de estudo. No entanto, as comparações com outros estudos corroboram com os resultados apresentados, gerando confiabilidade dos arquivos climáticos futuros, demonstrando que a metodologia empregada possui uma tendência confiável em sua aplicabilidade.

5.2 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES INTERNAS DAS TIPOLOGIAS CONSTRUTIVAS

As simulações das condições internas das tipologias construtivas e das estratégias bioclimáticas adotadas foram avaliadas quanto à Severidade, Intensidade e Horas em Vulnerabilidade, utilizando a Temperatura Efetiva Padrão (SET). Esses resultados foram organizados de acordo com a sequência metodológica estabelecida no capítulo 4, abrangendo o período histórico, 2050 e 2080, para as cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis. É relevante mencionar as nomenclaturas atribuídas às tipologias:

- i) HISbase: consiste na habitação multifamiliar em sua condição base, definida no Capítulo 3;
- ii) HISenv: consiste na habitação multifamiliar com a envoltória (paredes e cobertura) mais adequada em relação aos impactos das mudanças climáticas. Com destaque para:
 - a. HISenv1 (Upar de 1,83W/m²K e Ucob de 2,06W/m²K);
 - b. HISenv6 (Upar de 2,37W/m²K e Ucob de 0,68W/m²K);
 - c. HISenv9 (Upar de 1,83W/m²K e Ucob de 0,68W/m²K);
 - d. HISenv12 (Upar de 0,89W/m²K e Ucob de 2,06W/m²K) e
 - e. HISenv15 (Upar de 0,90W/m²K e Ucob de 0,68W/m²K).
- iii) HISenv+bri: consiste na habitação multifamiliar com a envoltória otimizada e a inclusão de dispositivos de sombreamentos do tipo brise nas janelas;
- iv) HISenv+Tverde: consiste na habitação multifamiliar com a envoltória otimizada e com a inclusão do telhado vegetativo como estratégia bioclimática e,
- v) HISenv+bri+Tverde: consiste na habitação multifamiliar com a envoltória otimizada, a inclusão de dispositivos de sombreamento do tipo brise nas janelas e com telhado vegetativo.

5.2.1 Severidade e Intensidade do evento de calor no interior dos ambientes das tipologias construtivas no período histórico e futuros (2050 e 2080)

A avaliação da severidade e intensidade do evento de calor no interior dos ambientes de permanência prolongada se baseou na análise das severidades e intensidades durante a exposição diurna (2.190 horas) e noturna (4.380 horas) dos ocupantes nas habitações em condição naturalmente ventilada. Destaca-se que o limite adotado para as análises foi de $SET \leq 26,0^{\circ}\text{C}$, correspondente a uma resposta fisiológica e sensação térmica “neutra” dos ocupantes, conforme

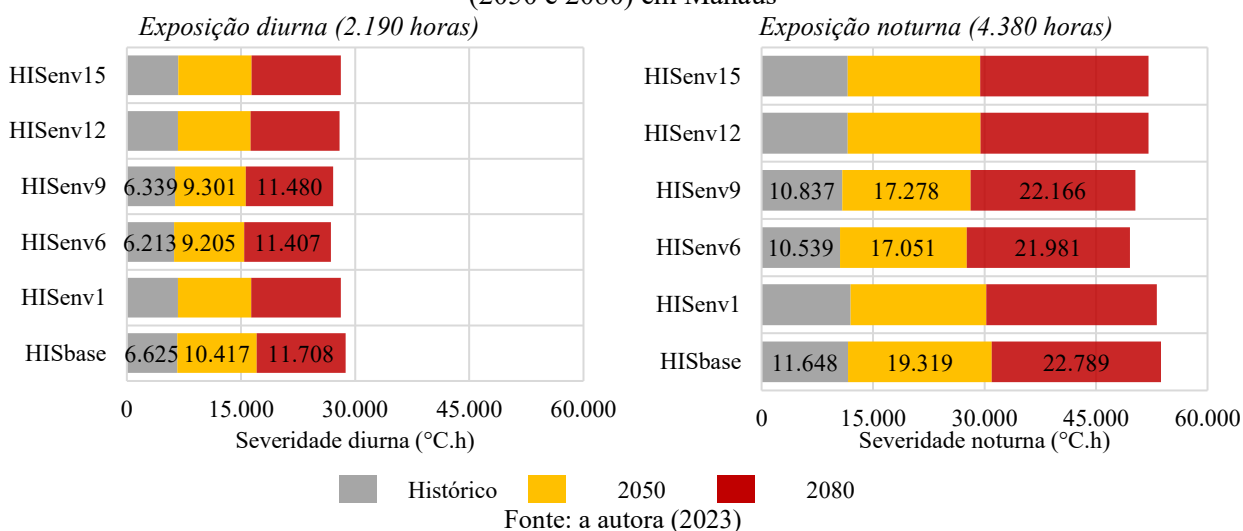
estabelecido no capítulo 4. Além disso, ressalta-se que a intensidade diurna ou noturna indica o desvio médio em relação ao limite adotado. Os resultados foram organizados considerando os períodos histórico, 2050 e 2080, nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis. Além disso, os resultados foram apresentados de maneira acumulativa, apresentando os três períodos de análise em uma única coluna do gráfico, com o intuito de analisar de forma visual a soma total da severidade ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) e intensidade ($^{\circ}\text{C}$).

5.2.1.1 Análise do impacto das intervenções na envoltória das tipologias na severidade e intensidade do evento de calor

Nesta análise, foram apresentadas apenas as tipologias com as envoltórias mais adequadas, a saber: HISenv1, HISenv6, HISenv9, HISenv12 e HISenv15, para cada cidade de análise e para os períodos histórico e futuros. Os resultados abrangentes de todas as envoltórias analisadas estão disponibilizados no Apêndice B e C. No entanto, é importante destacar que as alterações realizadas nas paredes não resultaram em melhorias nas condições internas das tipologias. Por outro lado, as intervenções realizadas na cobertura apresentaram reduções na severidade e intensidade, principalmente, com a implementação do isolamento na estrutura da telha (Apêndice B e C).

Em Manaus, observa-se um aumento da severidade durante os períodos de exposição diurna e noturna na tipologia HISbase de +57% e +66% em 2050 e de +77% e +96% em 2080 em comparação com período histórico, respectivamente (Figura 22). As tipologias que mais se destacaram foram a HISenv6 e a HISenv9, apresentando transmitância térmica nas paredes de $2,37\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ e $1,83\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, e para a cobertura, de $0,68\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ para ambas tipologias. Portanto, foram obtidas reduções na severidade diurna de -6% e -4% no período histórico, e de -3% e -2% em 2080, em comparação à HISbase, respectivamente. No período noturno, o qual conta com uma ocupação mais prolongada, essas reduções foram de -10% e -7% no período histórico, e de -4% e -3% em 2080. Destaca-se que para os dois períodos de exposição, as reduções da severidade foram de -12% e -11% em 2050, quando comparadas à HISbase.

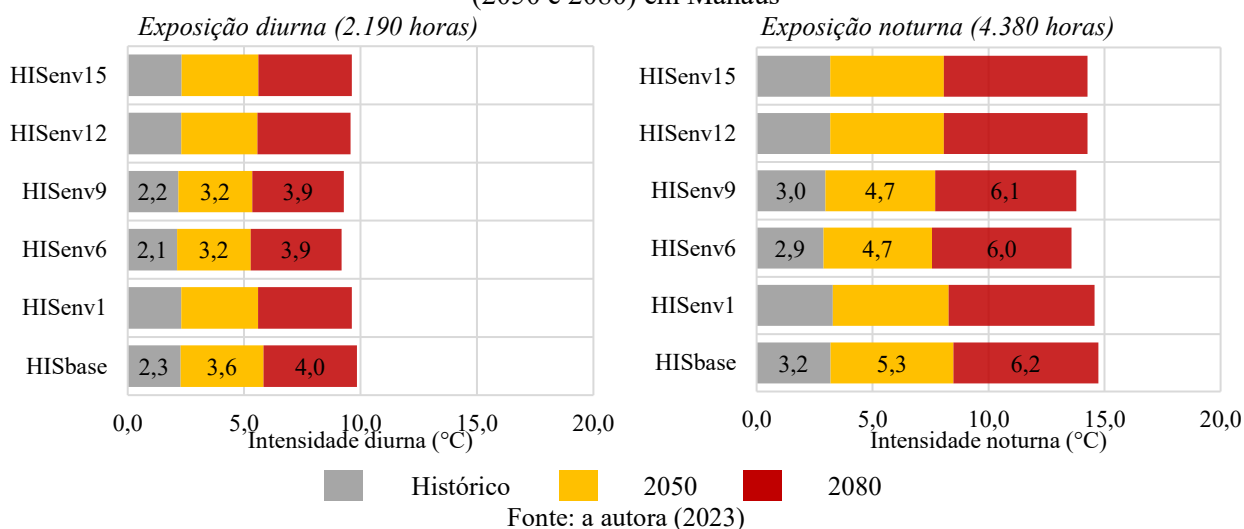
Figura 23 – Severidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



Em relação a intensidade desse evento de calor, na HISbase no período histórico durante a exposição diurna e noturna é de 2,3°C e 3,2°C, respectivamente. Com o impacto das mudanças climáticas, essa intensidade aumenta em cerca de +1,7°C e +3,1°C em 2080 (Figura 23). As intervenções na envoltória não resultaram em reduções significativas na intensidade do evento de calor para as tipologias HISenv1, HISenv12 e HISenv15. As Temperaturas Efetivas Padrão (SET) mantiveram-se acima da neutralidade térmica, com valores de 28,3°C no período histórico, 29,3°C em 2050 e 30,0°C em 2080 durante a exposição diurna.

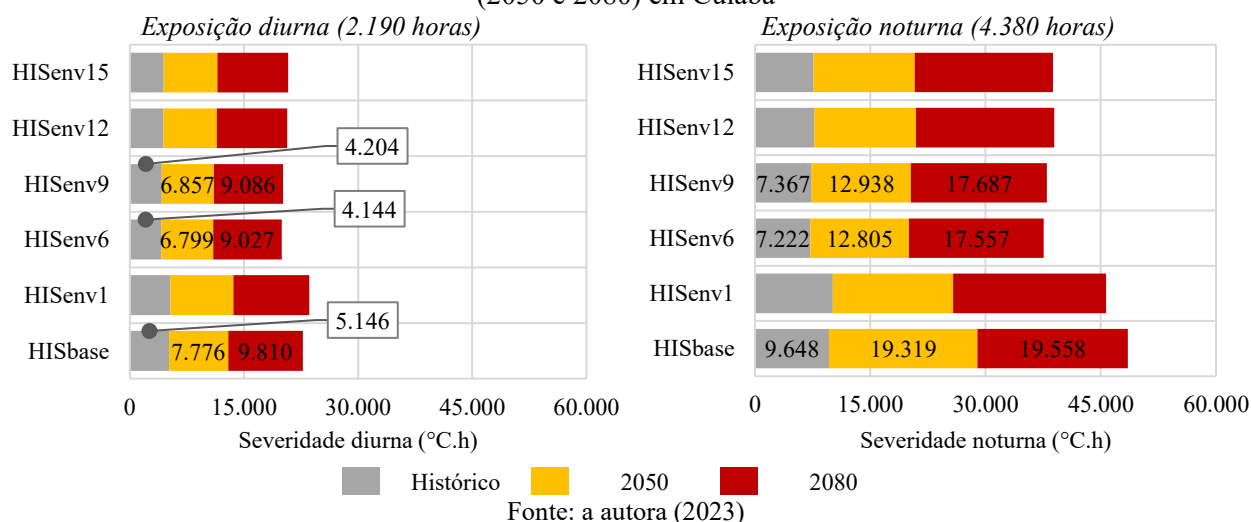
Durante a exposição noturna, esses valores ultrapassam os 32,0°C em 2080. Esse fenômeno pode ser atribuído à inércia térmica dos fechamentos, que absorvem e acumulam calor durante o dia, liberando-o gradualmente para o ambiente interno à noite, o que retarda o processo de resfriamento. Além disso, as temperaturas permanecem mais elevadas no período noturno. É importante ressaltar que a ocupação é mais prolongada durante a noite. Com a inserção de uma cobertura de baixa transmitância térmica, a intensidade na HISenv6 durante a exposição diurna e noturna reduziu-se em cerca de -0,1°C e -0,3°C no período histórico, -0,4°C e -0,6°C em 2050 e -0,1°C e 0,2°C em 2080, em comparação com a HISbase (Figura 23). No entanto, mesmo com essa redução, a HISenv6 ainda apresenta temperaturas efetivas padrão em torno de 29,9°C e 32,0°C durante a exposição diurna e noturna em 2080, respectivamente.

Figura 24 – Intensidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



Em Cuiabá, a severidade durante a exposição diurna na tipologia HISbase no período histórico totaliza 5.146°C.h, aumentando em aproximadamente +51% (+2.630°C.h) em 2050 e de +91% (+4.664°C.h) em 2080. Durante a exposição noturna, tais valores são de 9.648°C.h no período histórico, aumentando cerca de +103% (+9.910°C.h) em 2080 (Figura 24). A partir das intervenções na envoltória, é possível identificar uma redução na severidade diurna na tipologia HISenv6 de -19% no período histórico, de -13% em 2050 e de -8% em 2080, em comparação à HISbase. Durante a exposição noturna, essas reduções são ainda mais proeminentes, atingido os valores de -25%, -34% e -10% nos respectivos períodos, comparativamente à HISbase.

Figura 25 – Severidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá

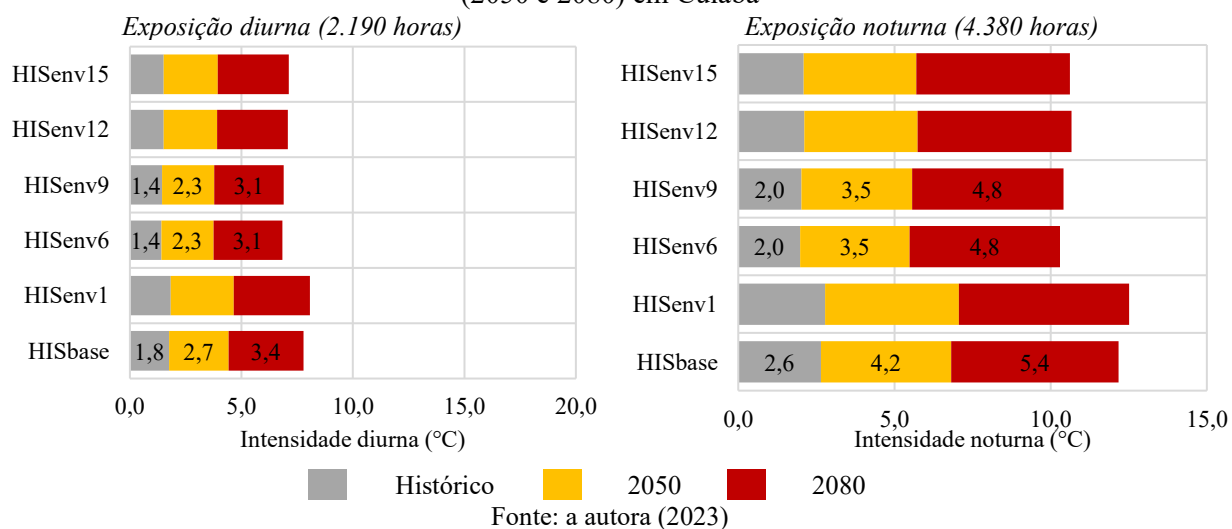


As intensidades durante a exposição diurna e noturna foram menores em Cuiabá em comparação com a cidade de Manaus. Na HISbase, no período histórico, a intensidade do evento

de calor durante a exposição diurna e noturna é de $1,8^{\circ}\text{C}$ e de $2,6^{\circ}\text{C}$, respectivamente, em relação ao limite de neutralidade térmica. Com os impactos das mudanças climáticas, a intensidade aumenta para $2,7^{\circ}\text{C}$ e $4,2^{\circ}\text{C}$ em 2050, e para $3,4^{\circ}\text{C}$ e $5,4^{\circ}\text{C}$ em 2080 (Figura 25).

Com relação às intervenções na envoltória, destaca-se que a HISenv1 apresentou valores superiores à HISbase, sendo de $1,8^{\circ}\text{C}$ e $2,8^{\circ}\text{C}$ no período histórico, de $2,8^{\circ}\text{C}$ e $4,3^{\circ}\text{C}$ em 2050 e de $3,4^{\circ}\text{C}$ e $5,5^{\circ}\text{C}$ em 2080, durante a exposição diurna e noturna, respectivamente. Ressalta-se que o sistema construtivo da HISenv1 consiste em cobertura de telha de fibrocimento e laje maciça, e paredes externas de alvenaria comum, com transmitâncias de $2,06\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ e $1,83\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, respectivamente. Portanto, em Cuiabá, a HISenv6 apresentou menores valores de intensidade durante a exposição diurna e noturna, sendo de $1,4^{\circ}\text{C}$ e $2,0^{\circ}\text{C}$ no período histórico, de $2,3^{\circ}\text{C}$ e $3,5^{\circ}\text{C}$ em 2050 e de $3,1^{\circ}\text{C}$ e $4,8^{\circ}\text{C}$ em 2080, respectivamente. Em comparação com a HISbase, observam-se reduções da intensidade durante a exposição diurna de $-0,3^{\circ}\text{C}$ em todos os períodos analisados, e durante a exposição noturna de $-0,7^{\circ}\text{C}$ no período histórico e 2050, e de $-0,5^{\circ}\text{C}$ em 2080 (Figura 25).

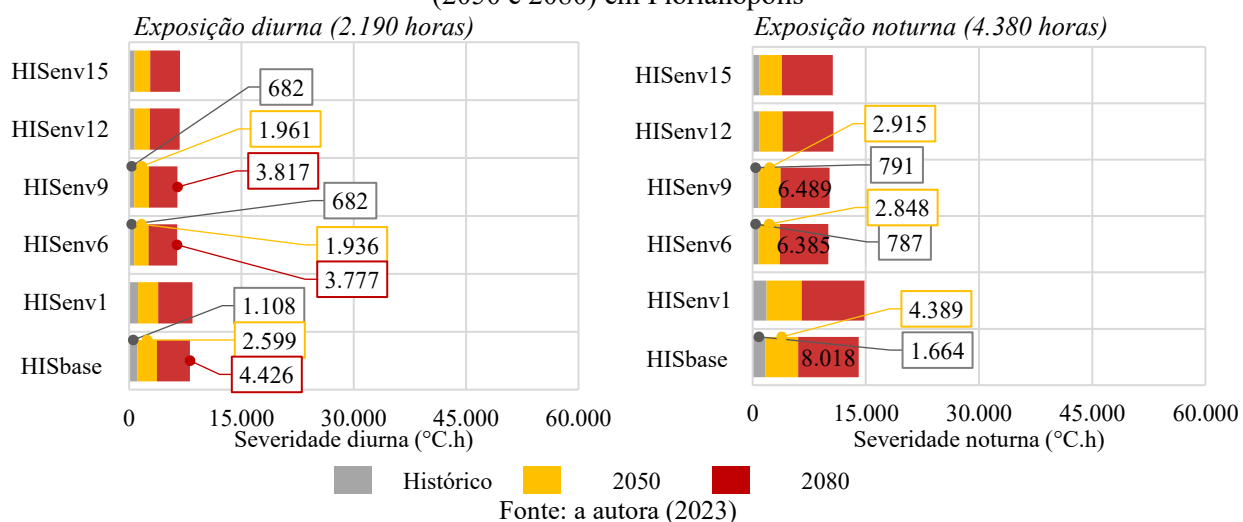
Figura 26 – Intensidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá



Em Florianópolis, uma região caracterizada por um clima ameno, evidenciam-se os maiores aumentos nos valores de severidade nos cenários climáticos futuros. Na HISbase, no período histórico, a severidade diurna totalizou $1.108^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, todavia, este valor se eleva para $4.426^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ em 2080, representando um aumento de aproximadamente $+300\%$. Em relação à exposição noturna, este aumento é de $+382\%$, sendo no período histórico de $1.664^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ passando para $8.8018^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ em 2080 (Figura 26).

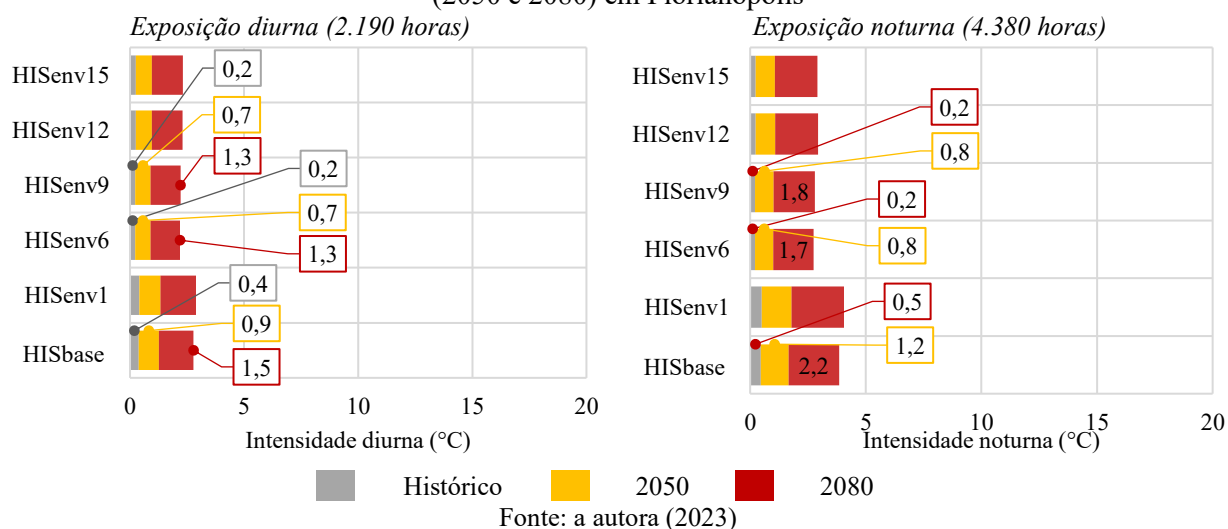
Considerando as intervenções, as tipologias com isolamento na cobertura (HISenv6), combinadas com paredes com baixa transmitância térmica (HISenv9), apresentaram menores valores de severidade durante a exposição diurna e noturna. Na HISenv6, durante ambas as exposições, a severidade no período histórico é de 682°C.h e de 787°C.h, refletindo em uma diminuição de -38% e de -53%, respectivamente, em relação à HISbase (Figura 26). No entanto, diante dos efeitos das mudanças climáticas, as intervenções nas paredes e cobertura não se mostram suficientes para contrapor a severidade no interior dos ambientes.

Figura 27 – Severidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis



Neste contexto, as intensidades são relativamente menores em relação às demais regiões estudadas, não ultrapassando 0,5°C no período histórico, durante a exposição diurna e noturna (Figura 27). No entanto, com os impactos das mudanças climáticas, no período de 2080, as condições internas excedem a neutralidade térmica em +1,1°C durante a exposição diurna e noturna em +1,7°C, na HISbase, em comparação com o período histórico. Com a melhoria da envoltória, a HISenv6 apresenta menores valores de intensidade durante a exposição diurna e noturna, com redução de -0,15°C e -0,24°C no período histórico, de -0,23°C e -0,42°C em 2050, e de -0,22°C e -0,45°C em 2080, em comparação com a HISbase.

Figura 28 – Intensidade nas tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis



Na Tabela 34, observa-se que os resultados destacam que as intervenções realizadas nas coberturas foram mais eficazes na redução da severidade em comparação com paredes externas. Reduzir a transmitância térmica da cobertura de $2,06\text{W/m}^2\text{K}$ na HISbase para $0,68\text{W/m}^2\text{K}$ na HISenv6 resultou em uma diminuição da severidade nas três cidades de análise. No entanto, as maiores reduções são observadas em Florianópolis e Cuiabá, principalmente durante a exposição noturna.

No entanto, é importante ressaltar, que devido aos impactos das mudanças climáticas e, ao consequente aumento da Temperatura de Bulbo Seco (TBS) em 2050 e 2080, observou-se um aumento na severidade no interior das tipologias, mesmo com a implementação de medidas de isolamento na cobertura. No período de 2080, por exemplo, a tipologia HISenv6 demonstrou um incremento de severidade tanto durante o dia quanto durante a noite, aproximadamente $+5.284^\circ\text{C.h}$ e $+11.442^\circ\text{C.h}$ em Manaus, $+4.883^\circ\text{C.h}$ e $+10.333$ em Cuiabá, e $+3.095^\circ\text{C.h}$ e $+5.598^\circ\text{C.h}$ em Florianópolis, respectivamente. Esses incrementos também são observados na intensidade do evento de calor.

Tabela 34 – Resumo da diferença de severidade e intensidade diurna e noturna entre as tipologias HISbase e HISenv6 nos períodos históricos e futuros (2050 e 2080)

	Tipologias	Histórico		2050		2080		
		Sev.	Int.	Sev.	Int.	Sev.	Int.	
Manaus	Exposição diurna	HISbase	6.625°C.h	2,3°C	10.417°C.h	3,6°C	11.708°C.h	4,0°C
		HISenv6	6.213°C.h	2,1°C	9.205°C.h	3,2°C	11.407°C.h	3,9°C
		* Δ Sev _D	-6%		-12%		-3%	
		* Δ I _D		-0,2°C		-0,4°C		-0,1°C
	Exposição noturna	HISbase	11.648°C.h	3,2°C	19.319°C.h	5,3°C	22.789°C.h	6,2°C
		HISenv6	10.539°C.h	2,9°C	17.051°C.h	4,7°C	21.981°C.h	6,0°C
** Δ Sev _N		-10%		-12%		-4%		
** Δ I _N			-0,3°C		-0,6°C		0,02°C	
Cuiabá	Exposição diurna	HISbase	5.146°C.h	1,8°C	7.776°C.h	2,7	9.810°C.h	3,4
		HISenv6	4.144°C.h	1,4°C	6.799°C.h	2,3	9.027°C.h	3,1
		* Δ Sev _D	-19%		-13%		-8%	
		* Δ I _D		-0,4°C		-0,4°C		-0,3°C
	Exposição noturna	HISbase	9.648°C.h	2,6°C	19.319°C.h	4,2°C	19.558°C.h	5,4°C
		HISenv6	7.222°C.h	2,0°C	12.805°C.h	3,5°C	17.557°C.h	4,8°C
** Δ Sev _N		-25%		-34%		-10%		
** Δ I _N			-0,6°C		-0,7°C		-0,6°C	
Florianópolis	Exposição diurna	HISbase	1.108°C.h	0,4°C	2.599°C.h	0,9°C	4.426°C.h	1,5°C
		HISenv6	682°C.h	0,2°C	1.936°C.h	0,7°C	3.777°C.h	1,3°C
		* Δ Sev _D	-38%		-26%		-15%	
		* Δ I _D		-0,2°C		-0,2°C		-0,2°C
	Exposição noturna	HISbase	1.664°C.h	0,5°C	4.389°C.h	1,2°C	8.018°C.h	2,2°C
		HISenv6	787°C.h	0,2°C	2.848°C.h	0,8°C	6.385°C.h	1,7°C
** Δ Sev _N		-53%		-35%		-20%		
** Δ I _N			-0,3°C		-0,4°C		-0,5°C	

* Diferença entre as severidades e intensidades durante a exposição diurna das tipologias HISbase e HISenv6

** Diferença entre as severidades intensidades durante a exposição noturna das tipologias HISbase e HISenv6

Fonte: a autora (2023)

5.2.1.2 Análise do impacto da implementação de estratégias passivas de projeto nas tipologias na severidade e intensidade do evento de calor

Com base na tipologia HISenv6, que demonstra valores reduzidos de severidade e intensidade frente aos impactos das mudanças climáticas, foram implementadas estratégias como telhado verde e os dispositivos de sombreamento do tipo brises nas janelas dos dormitórios e da sala. A eficácia dessas estratégias foi avaliada considerando tanto o período histórico quanto os futuros (2050 e 2080), com as janelas orientadas para o norte (0°).

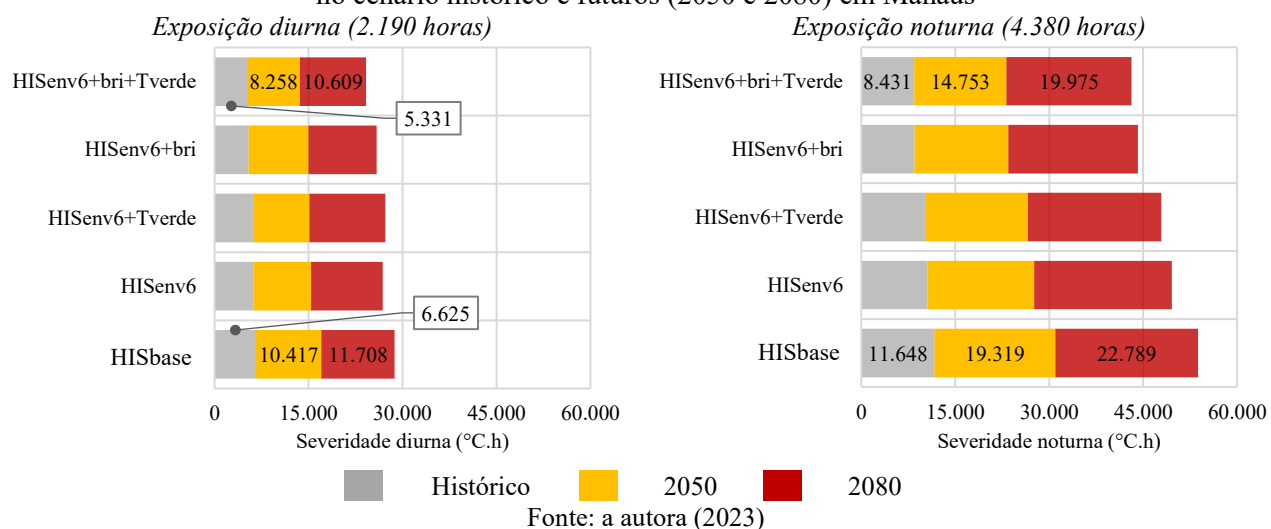
Em Manaus, a implementação do telhado verde (HISenv6+Tverde) resultou em um aumento na severidade diurna em 2080 em comparação com a HISenv6, com um aumento de +6%. Durante a exposição noturna, essa estratégia não demonstrou uma eficácia significativa no enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas, com uma redução de apenas -3% em 2080 (Figura 28). Esse resultado pode ser explicado pelo aumento na transmitância e na capacidade

térmica do sistema de cobertura. Enquanto a HISenv6 apresenta valores de $0,68\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ e $229\text{J}/\text{m}^2\text{K}$, o telhado verde possui valores mais elevados de $2,18\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ e de $363\text{J}/\text{m}^2\text{K}$. Isso pode resultar em ambientes mais quentes, em função de inércia térmica elevada. No entanto, é importante destacar que ainda existem diferenças entre as tipologias, e o telhado verde pode contribuir para o aumento da umidade do ar, o que, por sua vez, pode levar a reduções nas temperaturas e na melhoria das condições internas dos ambientes.

Na Figura 28, observa-se que a implementação dos dispositivos de sombreamento nas janelas dos dormitórios e sala (HISenv6+bri) resultou em reduções na severidade durante a exposição diurna de -13% no período histórico, de -4% em 2050 e de -5% em 2080, em comparação com a tipologia HISenv6. Durante a exposição noturna, essas reduções correspondem a -19%, -12% e -6% para os mesmos períodos. Isso sugere que os brises mantêm uma certa efetividade, mesmo durante a noite, na redução da severidade no interior dos ambientes. Essa eficácia pode ser explicada pela capacidade dos brises de reduzir a absorção de calor pelos fechamentos, minimizando o acúmulo de calor ao longo do dia e, conseqüentemente, liberando menos calor para o ambiente interno durante a noite.

A combinação de ambas as estratégias bioclimáticas (HISenv6+bri+Tverde) em Manaus resultou em reduções significativas na severidade durante a exposição diurna, sendo mais eficaz nos cenários climáticos futuros em comparação com a aplicação isolada de uma estratégia na habitação. Na Figura 28, observa-se que as reduções, durante a exposição diurna, foram de aproximadamente $-882^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ (-18%) no período histórico, $-946^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ (-13%) em 2050 e $-798^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ (-8%) em 2080, em relação à HISenv6. Durante a exposição noturna, as reduções correspondentes são de $-2.108^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ (-25%) no período histórico, $-2.298^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ (-16%) em 2050 e $-2006^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ (-11%) em 2080, também em comparação com a HISenv6.

Figura 29 – Severidade diurna e noturna das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



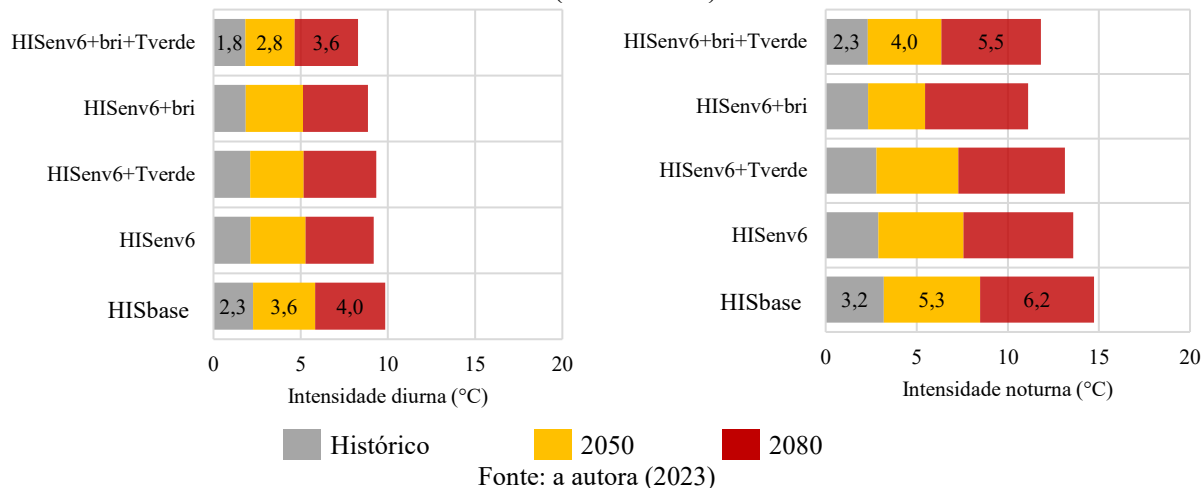
Como observado na severidade, ao implementar o telhado verde (HISenv6+Tverde), observa-se que durante a exposição diurna, essa estratégia levou a um aumento na intensidade do evento de calor no cenário de 2080, em relação à HISbase, correspondendo a 4,2°C. Em relação aos demais cenários, não apresentou reduções significativas na intensidade diurna, bem como durante a exposição noturna, ou seja, a eficácia desta estratégia para Manaus não contribui, substancialmente para enfrentar os impactos das mudanças climáticas (Figura 29). Isso pode ser justificado pelo aumento da inércia térmica da cobertura, resultando em ambientes internos mais quentes.

Na Figura 29, observa-se que com a implementação dos dispositivos de sombreamento (HISenv6+bri), obtiveram-se reduções na intensidade durante a exposição diurna de -0,4°C no período histórico, -0,3°C em 2050 e 2080, em comparação com a HISbase. A intensidade do evento de calor durante a exposição noturna apresentou maiores valores. No entanto, com a tipologia HISenv6+bri, foi possível alcançar reduções de -0,9°C no período histórico, -2,2°C em 2050 e -0,6°C em 2080, comparativamente à HISbase.

A combinação das duas estratégias passivas de projeto (HISenv6+bri+Tverde) resultou em reduções de até -1,3°C no cenário de 2050 durante a exposição noturna. Assim, são observadas reduções de -0,4°C, -0,7°C e -0,4°C no período histórico, 2050 e 2080, respectivamente, durante a exposição diurna, em relação à HISbase. A redução durante a exposição noturna foi relativamente maior, sendo de -0,9°C no período histórico, -1,4°C em 2050 e -0,8°C em 2080, comparativamente à HISbase (Figura 29). Portanto, com a combinação das estratégias durante a exposição diurna, as temperaturas efetivas padrão dos ambientes de permanência prolongada não excedem a 29,6°C nos

períodos analisados. No entanto, durante a exposição noturna, mesmo com a combinação das estratégias, esses valores ultrapassam os 31,0°C em 2080.

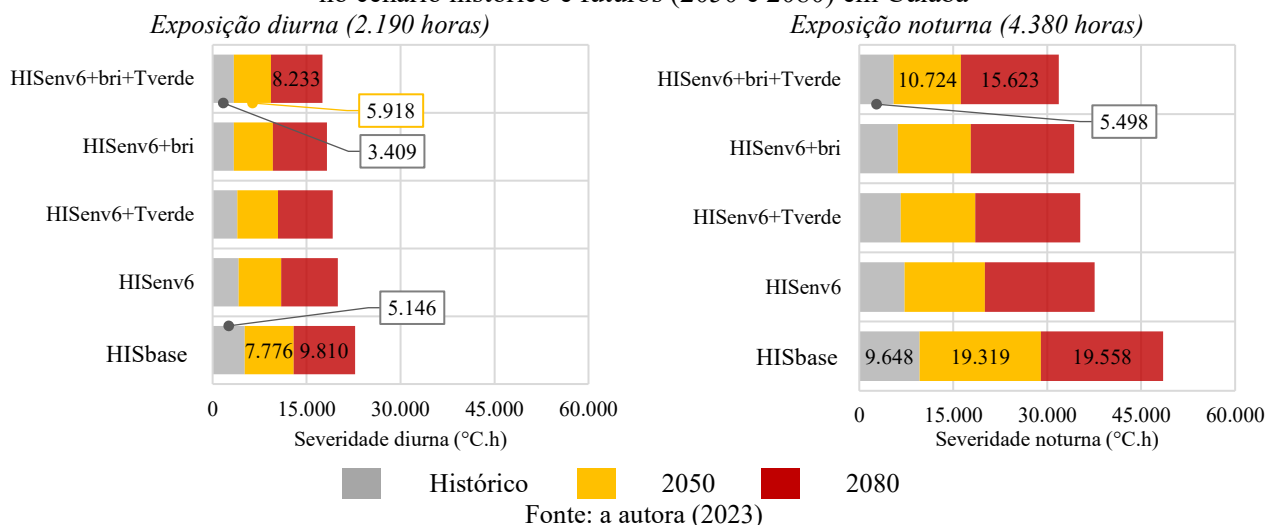
Figura 30 – Intensidade nas tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



Em Cuiabá, a estratégia de telhado verde combinada com a melhoria da envoltória apresentou um desempenho ainda melhor do que em Manaus. No período histórico, houve uma redução de aproximadamente -23% na severidade durante a exposição diurna em comparação com a HISbase (Figura 30). Nos cenários climáticos futuros, as reduções foram de -17% em 2050 e de -11% em 2080 em relação à HISbase. Durante a exposição noturna, a estratégia foi ainda mais eficaz, com reduções de até -38% em 2050 em comparação com a HISbase. Isso ocorreu devido ao clima quente e seco de Cuiabá, que o telhado verde ajudou a aumentar a umidade e, consequentemente, a reduzir as temperaturas.

Na Figura 30, observa-se que a estratégia de sombreamento por brises em Cuiabá proporcionou reduções de -35%, -19% e -12% durante a exposição diurna no período histórico, em 2050 e em 2080, respectivamente, em comparação com a HISbase. Durante a exposição noturna, as reduções correspondentes foram de -36%, -40% e -16%, respectivamente. Considerando a combinação das estratégias de telhado verde com sombreamento (HISenv6+bri+Tverde), a redução da severidade do evento de calor no interior dos ambientes pode chegar até -44% durante a exposição noturna em 2050, em comparação com a HISbase. Assim, no período histórico, a severidade durante a exposição diurna na HISbase foi de 5.146°C.h, reduzindo para 3.409°C.h (-34%) na HISenv6+bri+Tverde, e durante a exposição noturna foi de 9.648°C.h, reduzindo para 5.498°C.h (-43%), respectivamente. No cenário de 2080, a severidade durante a exposição diurna e noturna na HISbase foi de 9.810°C.h e 19.558°C.h, reduzindo para 8.233°C.h e 15.623°C.h na HISenv6+bri+Tverde, respectivamente.

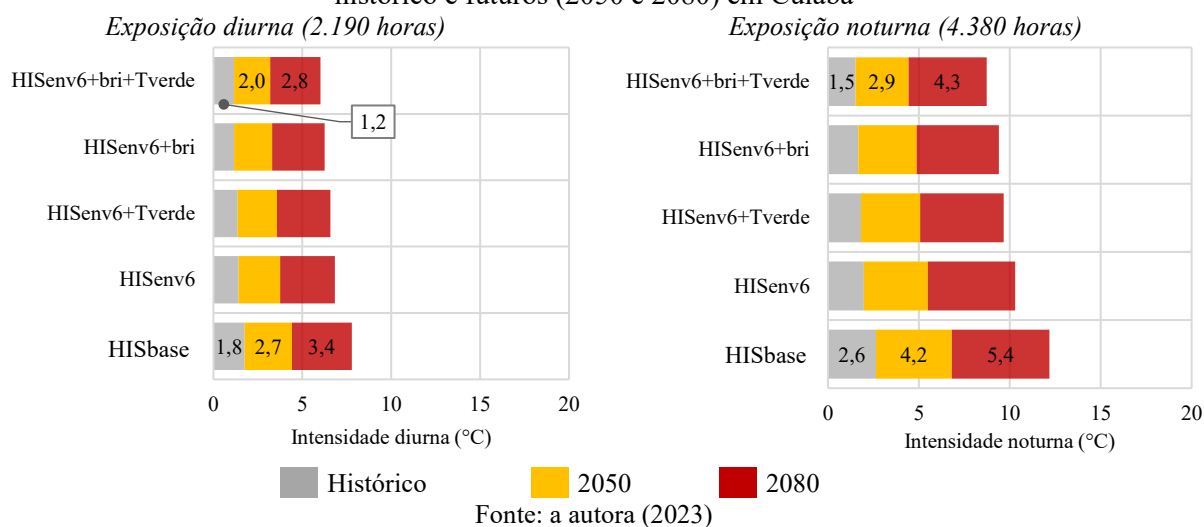
Figura 31 – Severidade diurna e noturna das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá



A intensidade do evento de calor durante a exposição diurna, com a implementação do telhado verde, obteve uma redução de $-0,4^{\circ}\text{C}$, e durante a exposição noturna, uma redução de $-0,8^{\circ}\text{C}$ nos períodos analisados, em relação à HISbase (Figura 31). No entanto, ao comparar as tipologias HISenv6+Tverde e HISenv6+bri, nota-se que as intensidades apresentaram comportamento semelhante, com diferenças de $0,2^{\circ}\text{C}$ no período histórico, $0,1^{\circ}\text{C}$ em 2050 e 2080, durante a exposição diurna, e de $0,1^{\circ}\text{C}$ nos três períodos durante a exposição noturna. Portanto, a implementação das estratégias no tipo climático de Cuiabá resulta em reduções na intensidade diurna e noturna de $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $-1,0^{\circ}\text{C}$ no período histórico e 2050, e de $-0,4^{\circ}\text{C}$ e $-0,8^{\circ}\text{C}$ em 2080, em comparação à HISbase.

Na Figura 31, observa-se que a tipologia HISenv6+bri+Tverde resultou em reduções na intensidade do evento de calor de $-0,6^{\circ}\text{C}$ no período histórico e 2050 e de $-0,5^{\circ}\text{C}$ em 2080 durante a exposição diurna, e na noturna de $-1,1^{\circ}\text{C}$ no período histórico, de $-1,2^{\circ}\text{C}$ em 2050 e de $-1,1^{\circ}\text{C}$ em 2080, em comparação com a HISbase. Dessa forma, observa-se que as condições no interior dos ambientes não excedem os $28,8^{\circ}\text{C}$ e $30,3^{\circ}\text{C}$ durante o período diurno e noturno.

Figura 32 – Intensidade nas tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá

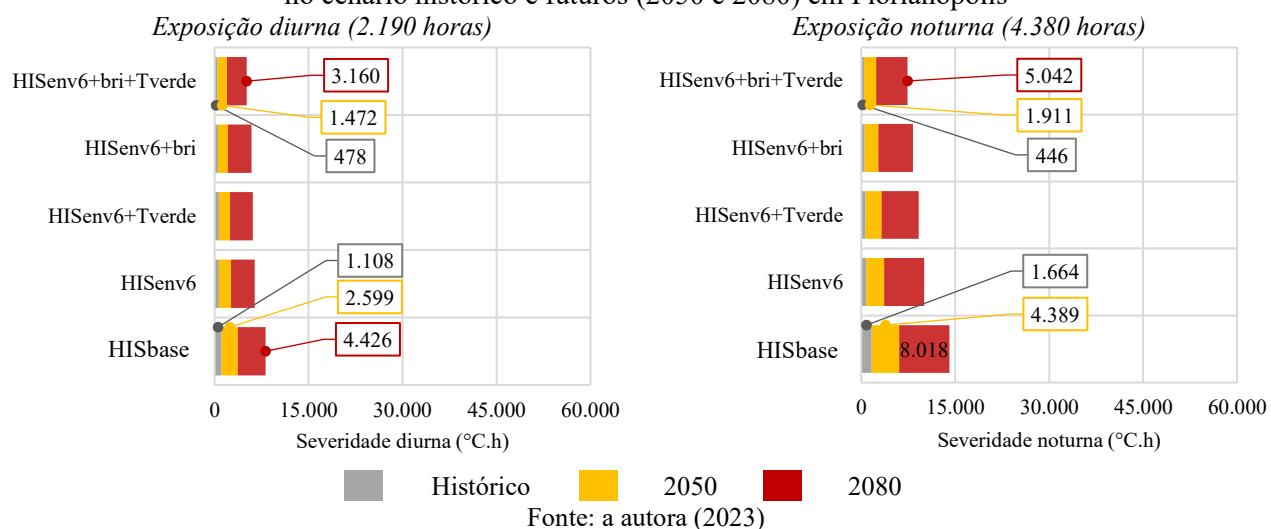


Em Florianópolis, no período histórico, a severidade durante a exposição diurna e noturna da HISbase foi de 1.108°C.h e 1.664°C.h, reduzindo para 658°C.h (-41%) e 697°C.h (-58%) com a implementação do telhado verde (HISenv6+Tverde), respectivamente (Figura 32). No período de 2080, essa redução foi de -18% e -26% durante a exposição diurna e noturna, em comparação com a HISbase.

No entanto, com a implementação dos dispositivos de sombreamento (HISenv6+bri), a redução da severidade do evento de calor durante a exposição diurna é de -602°C.h no período histórico, de -1009°C.h em 2050 e de -641°C.h em 2080. Durante a exposição noturna, essas reduções são maiores, sendo de -1.141°C.h no período histórico, de -2.172°C.h em 2050 e de -2.497°C.h em 2080, em relação à HISbase (Figura 32).

Neste contexto, a combinação das estratégias de telhado verde com a de sombreamento possibilita uma redução da severidade do evento de calor no interior dos ambientes de -57% no período histórico, de -43% em 2050, e de -29% em 2080, durante a exposição diurna, em relação à HISbase. Durante a exposição noturna, essas reduções são de -73% no período histórico, de -56% em 2050 e de -37% em 2080, comparadas à HISbase.

Figura 33 – Severidade diurna e noturna das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis

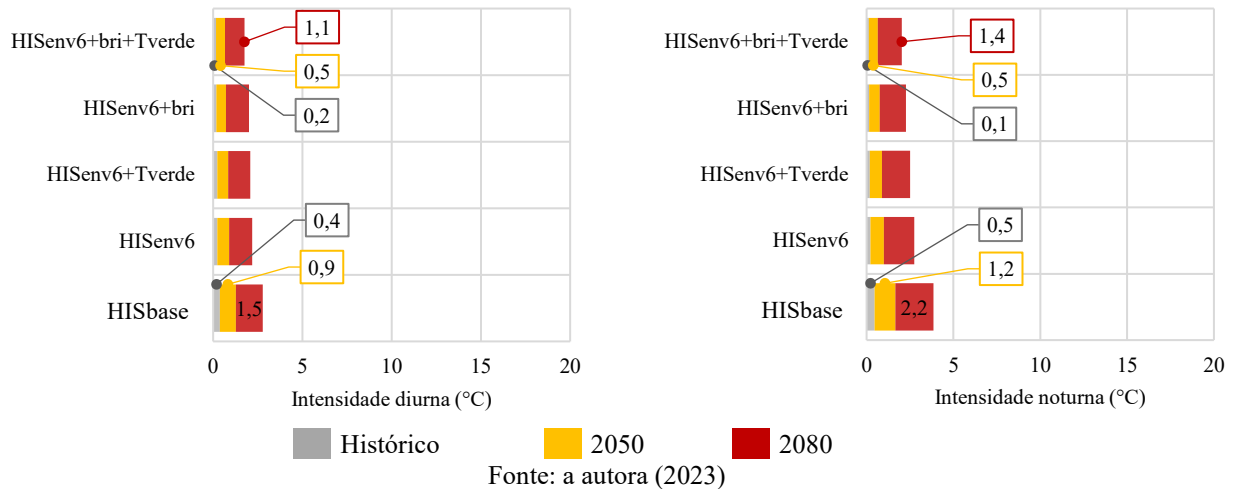


A intensidade do evento de calor durante a exposição diurna não ultrapassa 1,5°C em todos os cenários analisados, enquanto durante a exposição noturna, excede os 2,2°C em 2080. Na HISbase, a intensidade durante a exposição diurna é de 0,4°C no período histórico, aumentando para 1,5°C em 2080, enquanto durante a exposição noturna, é de 0,5°C, passando para 2,2°C em 2080 (Figura 33). Com a implementação da estratégia de telhado verde, a intensidade diurna do evento de calor reduz-se em -0,2°C no período histórico e em -0,3°C em 2050 e 2080, enquanto a redução durante a exposição noturna é de -0,3°C no período histórico, -0,5°C em 2050 e -0,6°C em 2080.

Contudo, as condições internas dos ambientes no período histórico atingem valores de 26,2°C com a implementação de dispositivos de sombreamento, ou seja, os riscos de superaquecimento e de estresse térmico dos ocupantes são reduzidos, levando os ambientes a níveis de neutralidade térmica. No entanto, com os impactos das mudanças climáticas, a intensidade do evento de calor na tipologia HISenv6+bri aumenta para 0,6°C em 2050 e para 1,2°C em 2080, levando os ambientes a temperaturas efetivas padrão de 26,5°C e 27,3°C, respectivamente (Figura 33). Esse mesmo comportamento é observado durante a exposição noturna.

Na tipologia HISenv6+bri+Tverde, as reduções na intensidade de calor no interior dos ambientes durante a exposição diurna são graduais, de -0,2°C no período histórico, -0,4°C em 2050 e 2080, bem como durante a exposição noturna, atingindo valores de redução de intensidade de -0,8°C em 2080 (Figura 33).

Figura 34 – Intensidade nas tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis



Com base nos resultados obtidos, observa-se que em Manaus, a implementação da estratégia, de forma isolada, resultou em reduções inferiores a 15% durante a exposição diurna em comparação com a HISbase. Portanto, a estratégia em clima quente úmido pode não ser tão efetiva para enfrentar as mudanças climáticas, devido à alta inércia térmica, que tende a aquecer os ambientes. A combinação da estratégia de telhado verde com o sombreamento permitiu alcançar reduções de severidade superiores a 20% em Manaus durante a exposição diurna e noturna no período histórico e em 2050. Em Florianópolis essa redução foi superior a 50% durante a exposição diurna e noturna no período histórico e em 2050. Essa combinação também resultou em reduções superiores a 40% em Cuiabá durante a exposição noturna e superior a 25% durante a exposição diurna no período histórico e em 2050 (Tabela 35).

No entanto, observa-se que o impacto da umidade relativa, combinado com elevadas temperaturas, principalmente nos cenários climáticos futuros, torna os ambientes mais quentes, resultando em valores de intensidade mais elevados durante a exposição diurna e noturna. Esse fenômeno é evidente na cidade de Manaus, que apresentou um desvio médio em relação ao limite de neutralidade de +6,2°C até 2080. Isso implica que os ocupantes estão suscetíveis a exposições diurnas acima de 32,2°C, o que pode levar a estresse térmico e a vulnerabilidade ao calor. No entanto, a adoção conjunta de estratégias passivas de projeto provoca reduções significativas nas intensidades, sobretudo, no período histórico e 2050 (Tabela 35).

Em contrapartida, em Cuiabá, cujo clima é caracterizado quente seco, o efeito da umidade nas condições internas dos ambientes pode ser menos proeminente, resultando em intensidades menores. No entanto, as condições internas da HISbase apresentam uma temperatura efetiva padrão

acima de 31,4°C em 2080, durante a exposição noturna (Tabela 35). A implementação das estratégias passivas de projeto demonstra eficácia em Cuiabá, apresentando reduções de intensidade de até 1,2°C em 2050 durante a exposição noturna.

Por fim, Florianópolis é caracterizada por um clima ameno. No período histórico, as condições internas das tipologias não apresentam ambientes propícios ao estresse térmico, visto que as temperaturas efetivas padrão não ultrapassam 26,5°C. No entanto, diante dos impactos das mudanças climáticas, as condições internas dos ambientes podem revelar temperaturas efetivas padrão acima de 28,2°C até 2080 durante a exposição noturna (Tabela 35). Com a implementação conjunta das estratégias, a intensidade de um evento de calor sofre reduções, apresentando condições internas em níveis de neutralidade térmica no período histórico.

Tabela 35 – Resumo da diferença da severidade e intensidade diurna e noturna entre as tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros

		Tipologias	Histórico		2050		2080	
			Sev	Int	Sev	Int	Sev	Int
Manaus	Exposição diurna	HISbase	6.625°C.h	2,3°C	10.417°C.h	3,6°C	11.708°C.h	4,0°C
		HISenv6+bri+Tverde	5.331°C.h	1,8°C	8.258°C.h	2,8°C	10.609°C.h	3,6°C
		* Δ Sev _D	-20%		-21%		-9%	
		* Δ I _D		-0,5°C		-0,8°C		-0,4°C
	Exposição noturna	HISbase	11.648°C.h	3,2°C	19.319°C.h	5,3°C	22.789°C.h	6,2°C
		HISenv6+bri+Tverde	8.431°C.h	2,3°C	14.753°C.h	4,0°C	19.975°C.h	5,5°C
** Δ Sev _N		-28%		-24%		-12%		
** Δ I _N			-0,9°C		-1,3°C		-0,7°C	
Cuiabá	Exposição diurna	HISbase	5.146°C.h	1,8°C	7.776°C.h	2,7	9.810°C.h	3,4
		HISenv6+bri+Tverde	3.409°C.h	1,2°C	5.918°C.h	2,0	8.233°C.h	2,8
		* Δ Sev _D	-34%		-24%		-16%	
		* Δ I _D		-0,6°C		-0,7°C		-0,6°C
	Exposição noturna	HISbase	9.648°C.h	2,6°C	19.319°C.h	4,2°C	19.558°C.h	5,4°C
		HISenv6+bri+Tverde	5.498°C.h	1,5°C	10.724°C.h	2,9°C	15.623°C.h	4,3°C
** Δ Sev _N		-43%		-44%		-20%		
** Δ I _N			-1,1°C		-1,3°C		-1,1°C	
Florianópolis	Exposição diurna	HISbase	1.108°C.h	0,4°C	2.599°C.h	0,9°C	4.426°C.h	1,5°C
		HISenv6+bri+Tverde	478°C.h	0,2°C	1.472°C.h	0,5°C	3.160°C.h	1,1°C
		* Δ Sev _D	-57%		-43%		-29%	
		* Δ I _D		-0,2°C		-0,4°C		-0,4°C
	Exposição noturna	HISbase	1.664°C.h	0,5°C	4.389°C.h	1,2°C	8.018°C.h	2,2°C
		HISenv6+bri+Tverde	446°C.h	0,1°C	1.911°C.h	0,5°C	5.042°C.h	1,4°C
** Δ Sev _N		-73%		-56%		-37%		
** Δ I _N			-0,4°C		-0,7°C		-0,8°C	

* Diferença entre as severidades e intensidades durante a exposição diurna das tipologias HISbase e HISenv6

** Diferença entre as severidades e intensidades durante a exposição noturna das tipologias HISbase e HISenv6

Fonte: a autora (2023)

Dessa forma, esses resultados estão em consonância com a análise dos ganhos de calor apresentados no Capítulo 3, que constatou que a cobertura e as janelas são responsáveis pela maior parcela do ganho de calor da habitação. Portanto, ao aprimorar esses fechamentos, é possível

reduzir a severidade do evento de calor no interior dos ambientes e melhorar as condições internas da habitação.

5.2.2 Horas em vulnerabilidade dos ocupantes das habitações no período histórico e futuros (2050 e 2080)

A análise das horas de vulnerabilidade dos ocupantes nos ambientes de permanência prolongada das diferentes tipologias construtivas foi realizada com base na exposição diurna (2.190 horas) e noturna (4.380 horas), considerando a habitação na condição naturalmente ventilada. Ressalta-se que as horas de vulnerabilidade correspondem às horas que excedem os limites de Neutro ($SET \leq 26^{\circ}C$), Ligeiramente Quente ($\geq 26^{\circ}C$ $SET < 30,0^{\circ}C$), Alerta ($\geq 30^{\circ}C$ $SET < 35,0^{\circ}C$) e Emergência ($SET \geq 35,0^{\circ}C$). Esses limites estão associados com sensações térmicas específicas, a saber: neutra, leve sudorese, média sudorese e profunda sudorese (que indica risco de falha na termorregulação), respectivamente, conforme detalhado no capítulo 4 deste estudo.

Os resultados apresentados aqui estão restritos às tipologias de envoltórias mais adequadas, ou seja: HISenv1, HISenv6, HISenv9, HISenv12 e HISenv15, para cada cidade analisada e para os períodos histórico e futuros. Os resultados abrangentes para todas as tipologias de envoltórias investigadas podem ser encontradas no Apêndice D.

5.2.2.1 Análise do impacto das intervenções na envoltória das tipologias nas horas em vulnerabilidade dos ocupantes

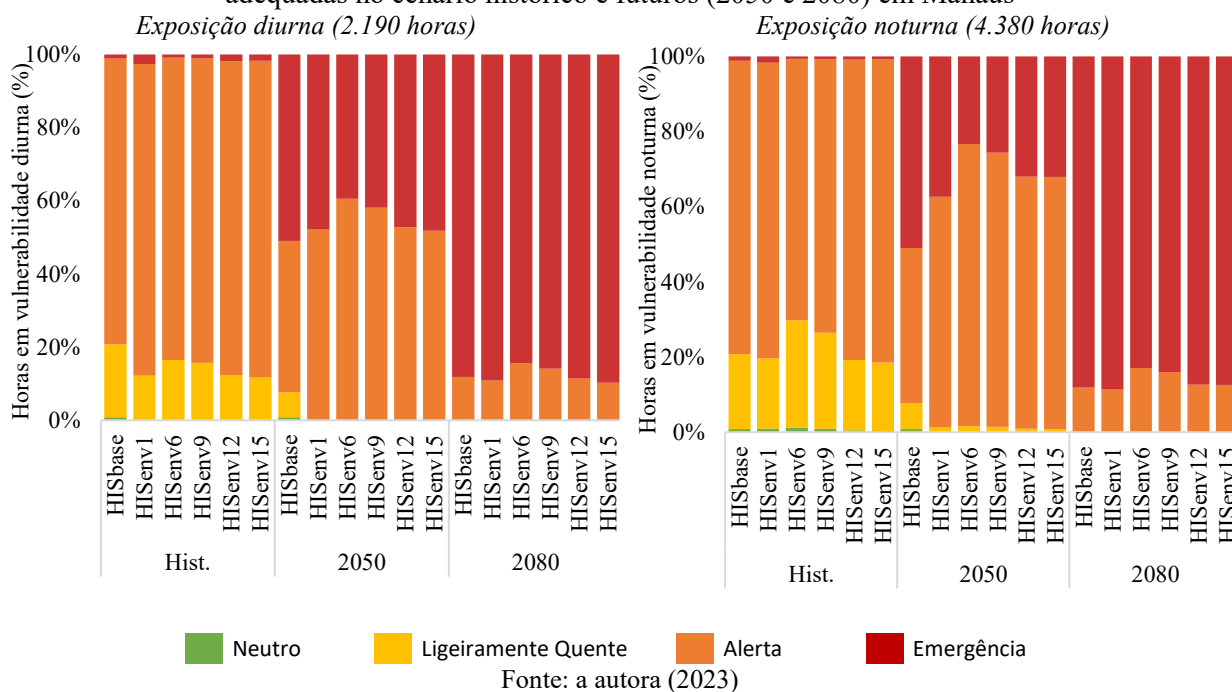
Em Manaus, não são obtidas horas em situações neutras nas tipologias analisadas, representando apenas 1% das horas durante a exposição diurna e noturna no período histórico. Assim, a HISbase no período histórico apresenta apenas 1% das horas em situações de emergência durante a exposição diurna e noturna. No entanto, essas horas aumentam para 51% em 2050 e para 88% em 2080 (Figura 34). É importante ressaltar que no período histórico, as horas em situações de emergência não ultrapassam 2% nas tipologias analisadas, sendo predominante as horas em situações de alerta e ligeiramente quente. Contudo, com os impactos das mudanças climáticas, as horas em situações de ligeiramente quente chegam a 0%, enquanto as horas em situação de alerta e emergência aumenta significativamente (Figura 34).

Portanto, com as intervenções na envoltória, são observadas reduções nas horas em situações de emergência nos cenários de 2050 e 2080, durante a exposição diurna. No entanto, nas tipologias HISenv12 e HISenv15, essas reduções são de cerca de -3% em relação à HISbase no cenário de 2050. Em 2080, observa-se que as tipologias apresentam horas em situação de

emergência superiores em 2%, em relação à HISbase, alcançando valores de 89% e 90%, respectivamente. Por outro lado, tipologias com isolamento somente na cobertura (HISenv6) podem reduzir o ganho de calor por radiação direta e diminuir as horas em situações de emergência em até -12% em 2050 e -4% em 2080, durante a exposição diurna, em comparação com a HISbase (Figura 34).

Esse mesmo padrão ocorre durante a exposição noturna, porém com porcentagens de horas menores. As horas em situação de emergência na HISenv6 são de 23% em 2050 e de 83% em 2080, representando uma redução de -28% e -5%, em relação à HISbase, respectivamente (Figura 34). Portanto, observa-se que tipologias com isolamento nas paredes e coberturas podem não ser eficazes para manter temperaturas em níveis adequadas no interior dos ambientes, diante das altas temperaturas externas, tornando os ambientes propícios à vulnerabilidade por calor dos ocupantes.

Figura 35 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



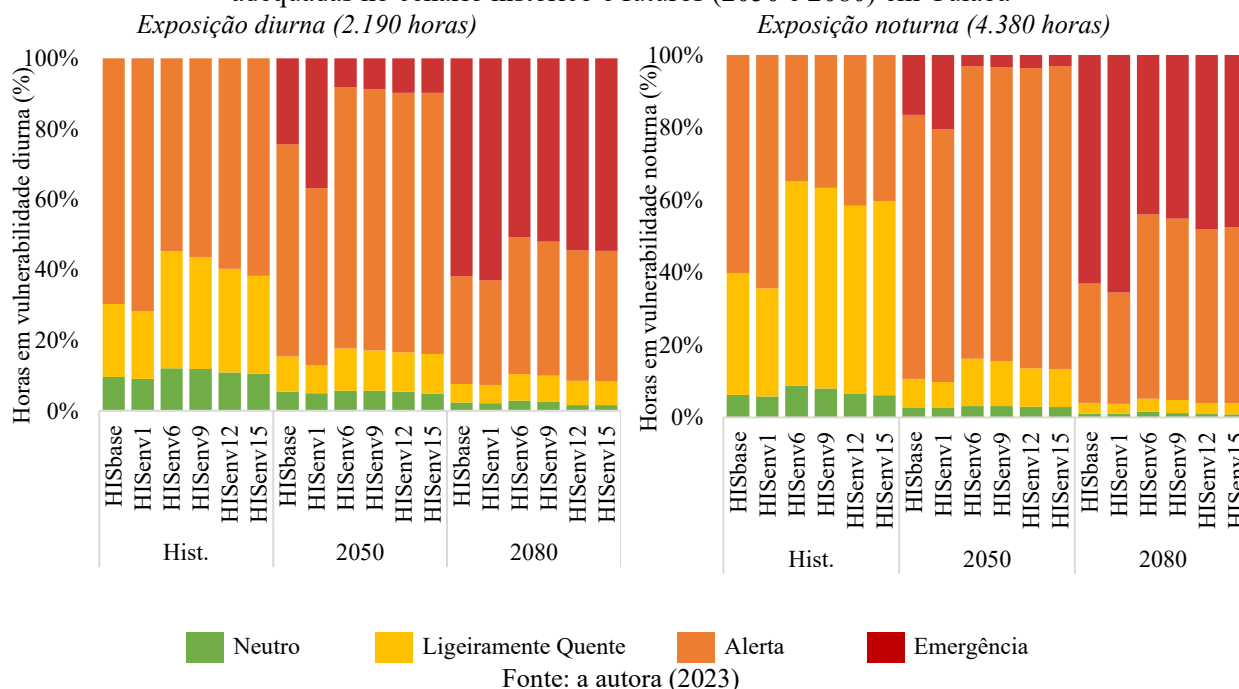
Em Cuiabá, as horas em situação neutra na HISbase, durante a exposição diurna e noturna, são de 10% e 6% no período histórico, reduzindo-se para 5% e 3% em 2050, e para 2% e 1% em 2080, respectivamente (Figura 35). As horas em situação de ligeiramente quente e alerta no período histórico na HISbase são de 21% e 70%, reduzindo-se para 10% e 60% em 2050, e para 5% e 31% em 2080, respectivamente. Conseqüentemente, observa-se um aumento das horas em situação de emergência, sendo de 0% no período histórico, passando para 24% e 62% das horas em 2050 e 2080, respectivamente, durante a exposição diurna. Esse comportamento é semelhante durante a

exposição noturna, sendo de 0% no período histórico das horas em situação de emergência, aumentando para 17% em 2050 e 62% em 2080 (Figura 35).

Com a melhoria da envoltória, não há aumento das horas em condições neutras, no entanto, as horas em situação de emergência reduzem. A tipologia HISenv6 apresenta horas em situação de emergência de 8% e 3% em 2050, e de 51% e 44% em 2080, ou seja, uma redução de -16% e -13%, e de -11% e -19% em comparação com a HISbase, durante a exposição diurna e noturna, respectivamente.

Como resultado dessas reduções, na Figura 35 observa-se que, as horas em situação de ligeiramente quente e alerta são maiores em relação à HISbase, com aumento em torno de +2% e +14%, e +2% e +8%, durante a exposição diurna, e noturna de +5% e +8% em 2050, e +1% e +18% em 2050 e 2080, respectivamente. No entanto, as condições internas em situação de emergência tornam-se alarmantes para a saúde dos ocupantes, podendo levar ao estresse térmico e até mesmo à falha na termorregulação. Portanto, com a melhoria da envoltória, a redução dessas horas é eficaz para manter as temperaturas internas abaixo de 35,0°C.

Figura 36 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá

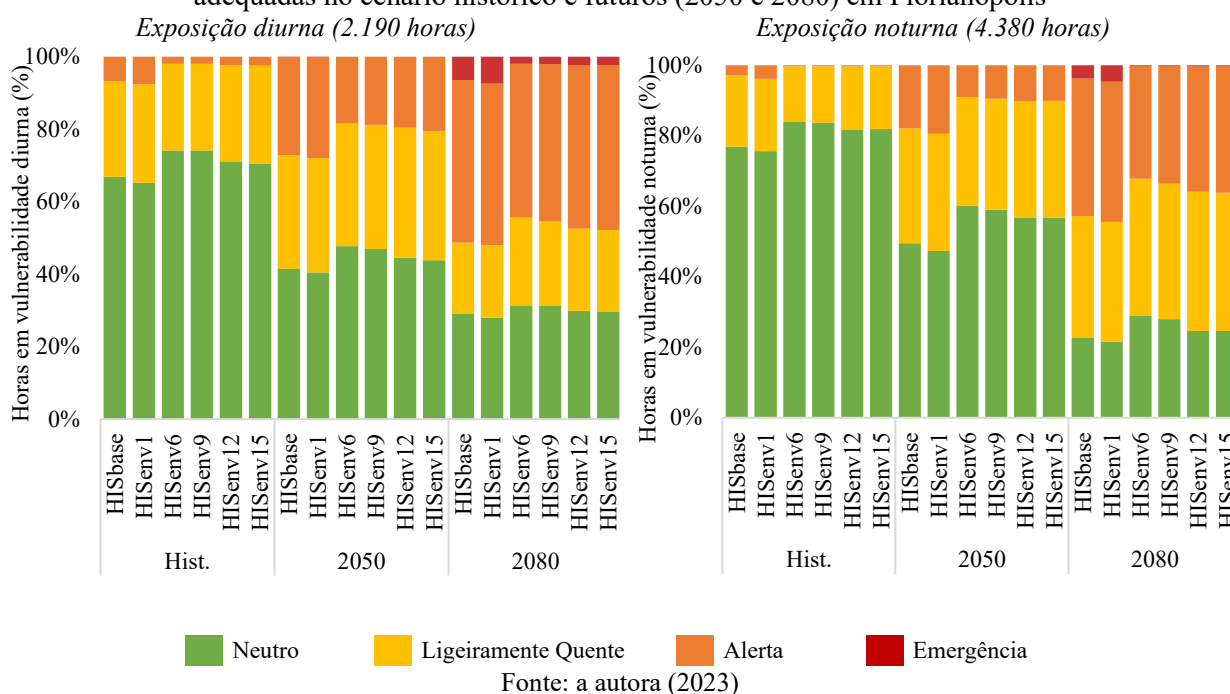


Em Florianópolis, a HISbase apresenta horas em situação neutra de 67% e 77% no período histórico, durante a exposição diurna e noturna, respectivamente. No entanto, com os impactos das mudanças climáticas, essas horas são reduzidas em torno de -25% e -38% durante a exposição diurna, e noturna em -27% e -54% para os cenários de 2050 e 2080, respectivamente (Figura 36).

As horas em situação de emergência não aumentam significativamente com os impactos das mudanças climáticas, no entanto, as horas em situação de alerta na HISbase no período histórico são de 7% durante a exposição diurna e noturna, e de 3% durante a exposição diurna, aumentando para 45%, e para 32% em 2080, respectivamente.

Dessa maneira, com a implementação do isolamento na cobertura, a tipologia HISenv6 apresenta maiores valores de horas em neutralidade térmica no período histórico, permanecendo nos cenários climáticos futuros, com 74%, 48% em 2050 e 31% em 2080, na exposição diurna, e com 84%, 60% e 29% na exposição noturna, para os mesmos períodos (Figura 36). Consequentemente, há uma redução nas horas em situação de alerta no cenário de 2050 em comparação com a HISbase, de -9% nas horas diurnas e noturnas. Por fim, no cenário de 2080, a HISbase apresenta 6% das horas diurnas em situação de emergência, e 4% das horas noturnas. No entanto, com a melhoria da cobertura, essas horas se reduzem-se a 0% na tipologia HISenv6.

Figura 37 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com as envoltórias mais adequadas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis



5.2.2.2 Análise do impacto da implementação de estratégias passivas de projeto nas tipologias nas horas em vulnerabilidade dos ocupantes

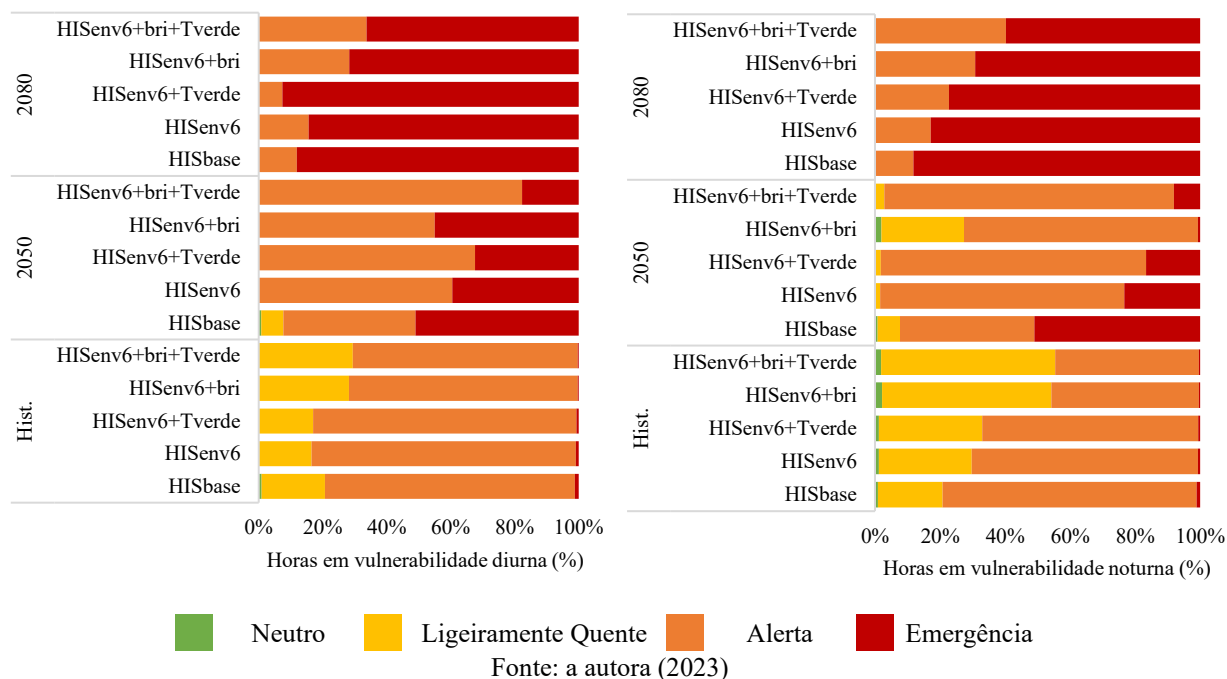
A implementação do telhado verde (HISenv6+Tverde) em Manaus, no período histórico, não demonstrou eficácia na redução das horas em vulnerabilidade durante a exposição diurna, em comparação com as tipologias HISbase e HISenv6. No entanto, durante a exposição noturna, essa

estratégia reduziu as horas em situação de alerta em -12%, comparativamente à HISbase (Figura 37). Com os impactos das mudanças climáticas, essa estratégia em Manaus pode resultar em ambientes mais quentes em função da alta inércia térmica, levando a um aumento das horas em situação de emergência em 92% no período de 2080, superando as horas da HISbase em +4%. No entanto, um contraponto dessa estratégia é evidenciado durante a exposição noturna, na qual 77% das horas noturnas estão em situação de emergência, contrastando com os 88% da HISbase.

No entanto, no período histórico, a estratégia de sombreamento por dispositivos do tipo brises nas janelas dos dormitórios e sala (HISenv6+bri) reduziu as horas em situações de alerta em -7% durante a exposição diurna e -33% durante a exposição noturna, além de reduzir as horas em situação de emergência em -1%, em comparação com a HISbase. Nos cenários de 2050 e 2080, essa estratégia proporciona uma redução de -6% e -16% das horas diurnas e de -50% e -19% das horas noturnas da situação de emergência, onde as temperaturas internas dos ambientes excedem os 35,0°C (Figura 37).

A combinação das duas estratégias (HISenv6+bri+Tverde) resultou em melhores condições internas dos ambientes e menores horas em vulnerabilidade dos ocupantes. No período histórico, as horas em situação de alerta durante a exposição diurna foram reduzidas em -8%, e no período noturno, em -34%, em comparação com a HISbase (Figura 37). Em 2050 e 2080, as horas em situação de emergência da HISbase são de 51% e 88% durante a exposição diurna, enquanto na tipologia HISenv6+bri+Tverde, essas horas reduzem-se para 18% e 66%, respectivamente. Esse mesmo padrão é observado durante a exposição noturna, com a HISbase apresentando 51% e 88% das horas em situação de emergência, enquanto na tipologia HISenv+bri+Tverde reduzem para 8% e 60% nos mesmos períodos.

Figura 38 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus
Exposição diurna (2.190 horas) Exposição noturna (4.380 horas)



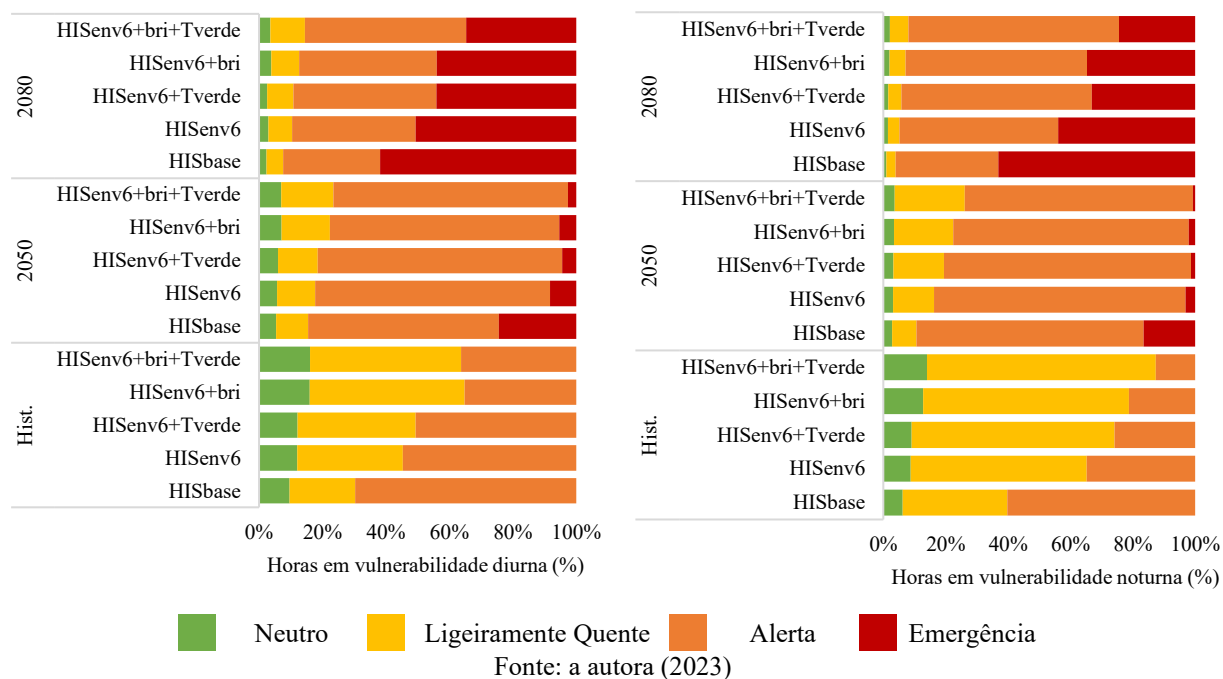
Em Cuiabá, as condições internas são relativamente mais amenas em comparação com o clima rigoroso de Manaus. Durante a exposição diurna e noturna, todas as tipologias avaliadas apresentaram horas em situação de neutralidade térmica acima de 16% e 14%, respectivamente, e nenhuma hora em situação de emergência, com exceção da HISbase. No entanto, devido aos impactos das mudanças climáticas, as horas em situação de neutralidade térmica reduzem para 2%, enquanto as horas em situação de emergência excedem a 60% em ambos os períodos analisados (Figura 38).

A tipologia HISenv6+Tverde reduziu as horas em situação de alerta em -19% e aumentou as horas em neutralidade térmica em +2% no período histórico, em comparação com a HISbase, durante a exposição diurna. Nos cenários de 2050 e 2080, essa estratégia manteve a eficácia, reduzindo as horas em situação de emergência em -20% e -18%, respectivamente (Figura 38). Durante a exposição noturna, as horas em situação de alerta da HISbase são de 60%, e com a implementação do telhado verde, as horas se reduzem para 26%. Nos cenários de 2050 e 2080, as horas em situação de emergência aumentam, sendo 17% e 63% na HISbase, enquanto na tipologia HISenv6+Tverde, são de 1% e 33%, ou seja, uma redução de -15% e -30%, respectivamente.

Na Figura 38, observa-se esse mesmo comportamento na tipologia HISenv6+bri. A implementação do telhado verde ou dos dispositivos de sombreamento melhora as condições internas nas mesmas proporções. No entanto, a combinação das duas estratégias resulta em

melhores condições internas, principalmente pela redução das horas em situação de emergência dos ocupantes no cenário de 2080. Portanto, a tipologia HISenv6+bri+Tverde apresenta redução nas horas em situação de alerta no período histórico em -33%, e das horas em situação de emergência em -22% em 2050 e -27% em 2080, durante a exposição diurna, em comparação com a HISbase. Durante a exposição noturna, essas reduções são de -48% das horas em situação de alerta, de -16% e -39% das horas em situação de emergência para os mesmos períodos (Figura 38).

Figura 39 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá
Exposição diurna (2.190 horas) Exposição noturna (4.380 horas)



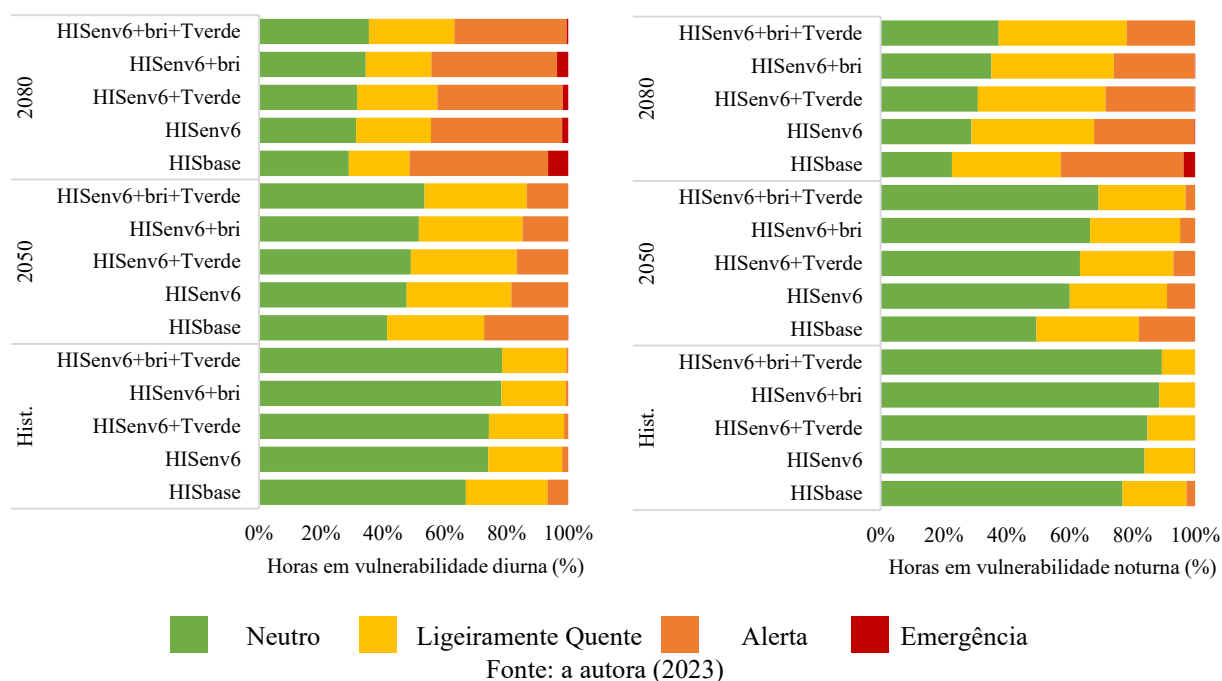
Em Florianópolis, as tipologias avaliadas demonstram melhores condições internas, com neutralidade térmica acima de 30% em todos os períodos. A implementação do telhado verde (HISenv6+Tverde) aumenta as horas em neutralidade térmica durante a exposição diurna e noturna, no período histórico para 74% e 85%, respectivamente, enquanto na HISbase são de 67% e 77%. Além disso, as horas em situação de alerta reduzem-se para 1% e 0% na mesma tipologia durante os mesmos períodos de exposição (Figura 39). No entanto, com os impactos das mudanças climáticas, as diferenças nas horas em neutralidade térmica entre as tipologias HISenv6+Tverde e HISbase são reduzidas para 49% e 41% em 2050 e 32% e 29% em 2080, durante a exposição diurna, respectivamente.

A tipologia HISenv6+bri apresenta um comportamento semelhante à tipologia HISenv6+Tverde. No entanto, as horas em neutralidade térmica durante a exposição diurna

aumentam, sendo de 78% no período histórico, de 53% em 2050 e de 35% em 2080, demonstrando uma melhoria nas condições internas de +12%, +10% e +5%, em comparação com a HISbase, respectivamente. Esse mesmo padrão é observado durante a exposição noturna (Figura 39).

A combinação das duas estratégias, tipologia HISenv6+bri+Tverde, reduz as horas em situação de emergência para 0% em 2080 durante a exposição diurna quanto noturna dos ocupantes. As horas em situação de alerta da HISbase no período histórico são de 7%, aumentando para 27% em 2050 e 45% em 2080. No entanto, com a implementação das estratégias, essas horas reduzem-se para 1%, 13% e 36%, respectivamente, durante a exposição diurna (Figura 39). Durante a exposição noturna, esse padrão se repete, porém, as horas em situação de alerta na tipologia HISenv6+bri+Tverde são de 0% no período histórico, 3% em 2050 e 22% em 2080.

Figura 40 – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes das tipologias com a implementação das estratégias bioclimáticas no cenário histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis
Exposição diurna (2.190 horas) *Exposição noturna (4.380 horas)*



Por fim, observa-se que em Manaus as condições internas das tipologias não atingem horas de neutralidade térmica durante a exposição diurna e noturna. Além disso, as horas em situação ligeiramente quente são menores que as horas em alerta, indicando que as temperaturas internas estão acima de 30,0°C. No entanto, com a combinação das estratégias passivas de projeto, essas temperaturas reduzem, resultando em um aumento das horas em situação de ligeiramente quente no período histórico, ou seja, as temperaturas internas estão entre 26,0°C e 30,0°C.

Com as mudanças climáticas, em Manaus, as horas em situação de emergência aumentam consideravelmente, representando mais de 80% das horas diurnas e noturnas. Isso significa que os ocupantes estão expostos a temperaturas acima de 35,0°C na maioria das horas, o que os coloca em condições de vulnerabilidade ao calor. Essa exposição pode resultar em sensação de sudorese intensa e risco de falha na termorregulação.

Em Cuiabá, que possui clima quente e seco, no período histórico, observa-se que no interior das tipologias as temperaturas são inferiores a 26,0°C em até 14% das horas durante a exposição noturna. No entanto, a maioria das horas diurnas e noturnas apresentam temperaturas acima de 30,0°C, indicando uma situação de alerta. A adoção de estratégias de melhoria na envoltória, incluindo telhado verde e dispositivos de sombreamento nas janelas, resultou em uma redução significativa das horas de situação de emergência sob os impactos das mudanças climáticas, com uma diminuição de até -39% nas horas noturnas. Em Florianópolis, as horas de situação de emergência são inferiores a 6%, tanto no período histórico quanto em 2080. Com a implementação das estratégias, as condições internas da tipologia alcançam até 89% das horas com temperaturas inferiores a 26,0°C. No entanto, com o aumento das temperaturas externas, as horas de situação de ligeiramente quente e alerta aumentam em até 36% nessa tipologia.

5.2.3 Conclusões das análises das condições internas no período histórico e futuros (2050 e 2080): Um olhar para os ambientes internos e propostas de diretrizes construtivas em habitações residenciais

A partir das análises acima, observa-se a severidade total (considerando as exposições diurnas e noturnas dos ocupantes) correlacionado com os limites de resposta fisiológica dos ocupantes, para as tipologias HISbase, HISenv6, HISbri, HISTverde e HISenv6+bri+Tverde. O intuito desta análise é investigar o impacto das mudanças climáticas nas condições térmicas internas dos ambientes Sala/Cozinha, dormitório 1 e 2, e a capacidade de enfrentamento das estratégias passivas de projeto implementadas nas tipologias. Ressalta-se que os limites considerados correspondem a Neutro ($SET \leq 26^{\circ}C$), Ligeiramente Quente ($\geq 26^{\circ}C$ $SET < 30,0^{\circ}C$), Alerta ($\geq 30^{\circ}C$ $SET < 35,0^{\circ}C$) e Emergência ($SET \geq 35,0^{\circ}C$).

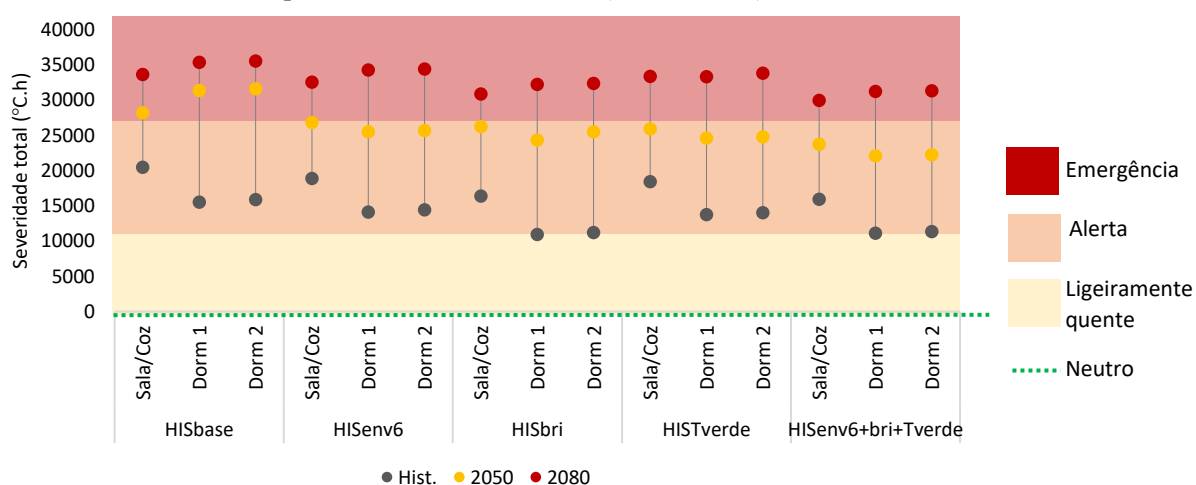
Destaca-se que ambientes de descanso, como os dormitórios, que são ocupados por mais horas, deveriam apresentar condições internas favoráveis para manter o bem-estar dos ocupantes. No entanto, apresentam condições internas superaquecidas, tornando os ocupantes vulneráveis ao calor no período de sono. Assim, em Manaus, na tipologia HISbase, observa-se uma severidade total nos dormitórios de 15.734°C.h no período histórico, aumentando para 35.471°C.h em 2080,

um aumento de +125%. Na sala/cozinha, esse aumento foi de +64% (Figura 40). No entanto, na HISenv6+bri+Tverde observa-se uma redução na severidade total nos dormitórios de -12% em 2080, em comparação com a HISbase. Esse comportamento também foi observado na sala/cozinha.

Conforme a Figura 40, a intensidade do evento de calor nos dormitórios, no período histórico, varia entre 4,3°C na HISbase e HISenv6+bri+Tverde, resultando em temperaturas efetivas padrão em torno de 30,3°C e 29,2°C nos dormitórios das tipologias, respectivamente. Com os impactos das mudanças climáticas, essa intensidade aumenta para 9,7°C na HISbase e 8,6°C na HISenv6+bri+Tverde, levando as temperaturas SET a atingirem 35,7°C nos dormitórios da HISbase, colocando os ocupantes em situação de emergência, com sensação térmica de sudorese profunda e risco de falha na termorregulação.

Em Manaus as intervenções na envoltória e a aplicação de estratégias passivas de projeto não apresentaram efetividade para o enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas, tanto no período histórico quanto nos cenários climáticos futuros. Além disso, os resultados apontam que as horas em situação neutra são praticamente inexistentes, enquanto as horas em situação de emergência aumentam significativamente em 2080. No entanto, a estratégia de sombreamento por brises (HISenv6+bri) apresentou maior efetividade entre as estratégias aplicadas, reduzindo a severidade e intensidade do calor nos ambientes.

Figura 41 – Consolidação da severidade total com os limites de resposta fisiológica dos ocupantes no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



Fonte: a autora (2023)

Em Cuiabá, observa-se um comportamento semelhante ao de Manaus, embora com diferenças significativas na severidade total nos dormitórios e na sala/cozinha entre as cidades. Na Figura 41, observa-se que a severidade de calor nos ambientes se concentra na faixa de temperatura de situações de alerta, enquanto Manaus, na faixa de temperatura de situação em emergência. Neste

contexto, a severidade total no período histórico na HISbase em Cuiabá é de 11.015°C_h aumentando em +159% em 2080, nos dormitórios.

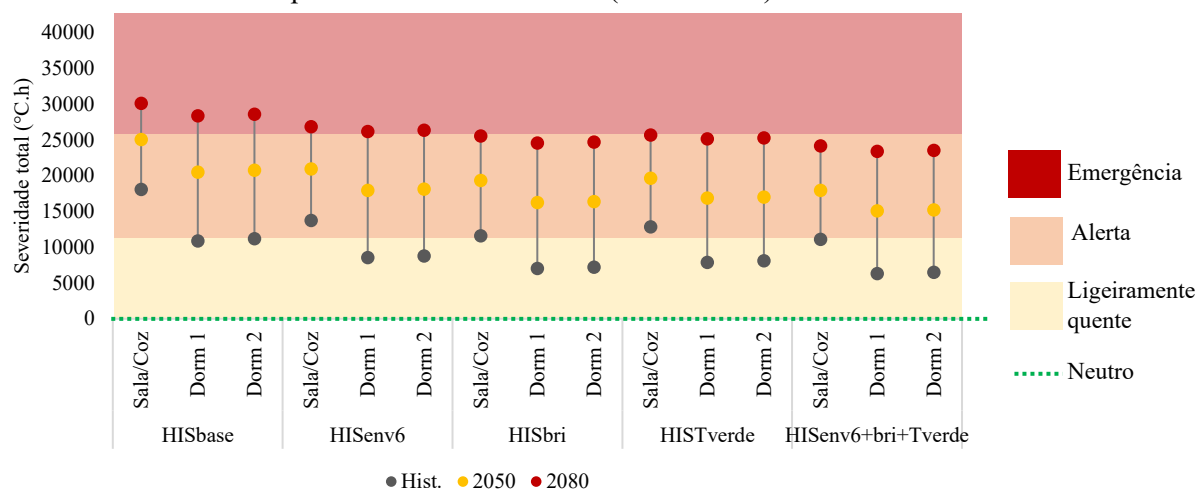
As intervenções na envoltória se mostraram eficazes na redução da severidade total nos dormitórios e na sala/cozinha em Cuiabá, com redução de -22% e -24% no período histórico e -8% e -11% em 2080, respectivamente, em comparação com a HISbase (Figura 41). Em Manaus, essa intervenção não resultou em reduções superiores a 10% em todos os períodos analisados. A estratégia de sombreamento mostrou ser mais eficaz na mitigação dos impactos das mudanças climáticas em Cuiabá, reduzindo a severidade total dos dormitórios em -14% em 2080, enquanto a estratégia de telhado verde reduziu em -11% em 2080. No entanto, a combinação dessas estratégias resultou em uma maior eficácia, com redução de -18% nos dormitórios e -20% na sala/cozinha.

Conforme a Figura 41, a intensidade do evento de calor nos dormitórios em Cuiabá, no período histórico, variou entre 3,0°C na HISbase e 1,8°C na HISenv6+bri+Tverde, resultando em temperaturas efetivas padrão em torno de 29,0°C e 27,8°C nos dormitórios das tipologias, respectivamente. A estratégia de sombreamento se mostrou mais eficaz do que a estratégia de telhado verde, mas a combinação de ambas apresentou as menores intensidades do evento de calor nos dormitórios. Com os impactos das mudanças climáticas, essa intensidade aumenta para 7,8°C e 6,4°C em 2080, respectivamente, para as tipologias, atingindo valores de 33,8°C nos dormitórios da HISbase, colocando os ocupantes em situação de alerta, com sensação térmica de sudorese média.

Portanto, observa-se que as intervenções na envoltória em Cuiabá também não se mostram eficazes diante do aumento das temperaturas devido às mudanças climáticas. No entanto, a implementação do telhado verde demonstrou uma certa efetividade na redução da severidade e intensidade, o que pode ser justificado pelo tipo climático da região, caracterizado por um clima quente e seco. Nesse contexto, o telhado verde pode contribuir para o aumento da umidade relativa do ar e, conseqüentemente, melhorar as condições internas dos ambientes, especialmente em comparação com o clima de Manaus.

No entanto, observa-se que estratégias isoladas não são tão eficazes, sendo recomendável a implementação conjunta, como a combinação de sombreamento e alta inércia na cobertura (telhado verde), para enfrentar os impactos das mudanças climáticas nesse tipo de clima. Além disso, é importante ressaltar que em 2080, os impactos das altas temperaturas podem tornar as estratégias passivas de projeto ineficazes, pois não apresentam diferenças significativas entre essas, com uma diferença de apenas 0,01°C entre sombreamento e telhado verde.

Figura 42 – Consolidação da severidade total com os limites de resposta fisiológica dos ocupantes no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá



Fonte: a autora (2023)

Em climas amenos, como o de Florianópolis, observa-se um aumento significativo na severidade de calor frente aos impactos das mudanças climáticas, aumentando os riscos de estresse térmico para os ocupantes nos ambientes de permanência prolongada. No entanto, ao contrário das demais cidades analisadas, a severidade de calor em Florianópolis concentra-se na faixa de temperatura considerada ligeiramente quente.

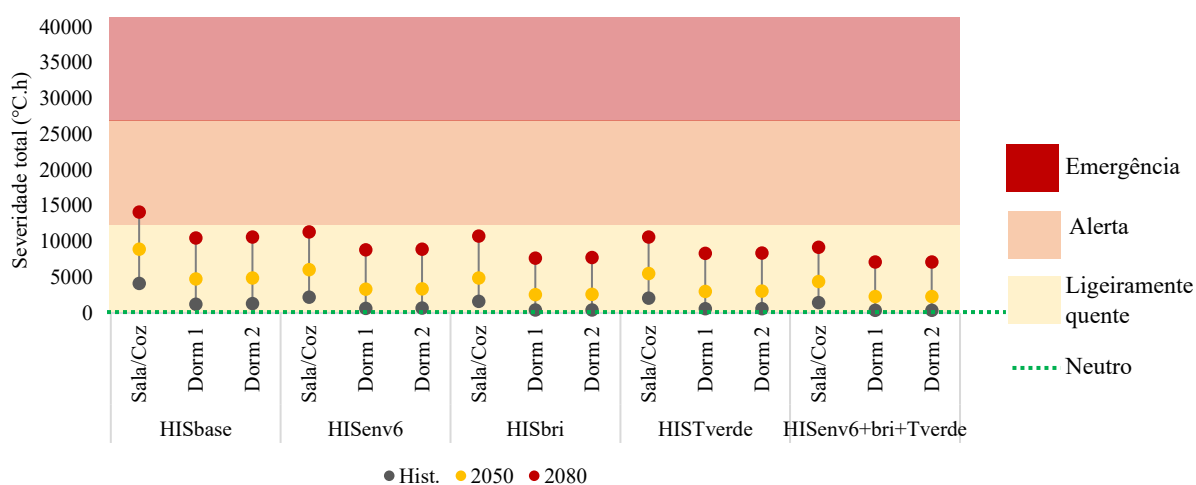
No período histórico, a severidade total nos dormitórios da tipologia HISbase foi de 1.288°C.h, aumentando significativamente para 10.606°C.h (+741%) em 2080. Na sala/cozinha, esse aumento foi de +244%, totalizando uma severidade de 14.111°C.h em 2080 em comparação com o período histórico. A implementação de dispositivos de sombreamento se mostrou mais eficaz na redução da severidade total nos dormitórios em comparação com o telhado verde e intervenções na envoltória. A redução da tipologia HISbri foi de -27% em relação à HISbase em 2080, enquanto a HISTverde foi de -21%, com uma diferença de cerca de 6% entre as tipologias (Figura 42).

Em relação à intensidade do evento de calor nos dormitórios, em comparação com regiões de climas quentes, Florianópolis apresenta intensidades relativamente baixas, mantendo a maioria das horas com as condições dos ambientes em torno de 26,0°C, ou seja, na neutralidade térmica. No período histórico, a intensidade do evento de calor nos dormitórios em Florianópolis variou entre 0,30°C na HISbase e 0,10°C na HISenv6+bri+Tverde, resultando em temperaturas efetivas padrão na faixa de 26,10°C a 26,30°C nos dormitórios das tipologias, respectivamente. No entanto, os impactos das elevadas temperaturas devido às mudanças climáticas aumentam significativamente a intensidade do evento de calor nos ambientes, atingindo valores de 2,9°C e

1,9°C, respectivamente, para as tipologias em 2080, resultando em temperaturas de até 28,9°C nos dormitórios da HISbase, colocando os ocupantes em uma situação considerada ligeiramente quente, com sensação térmica de sudorese leve.

Assim, é importante destacar que em climas amenos ou frios, os impactos das mudanças climáticas aumentam significativamente, tanto a severidade quanto a intensidade do evento de calor, tornando os ambientes mais quentes e expondo os ocupantes ao calor. Além disso, deve-se levar em consideração que a capacidade dos ocupantes em suportar temperaturas elevadas nessas regiões é menor em comparação com ocupantes que residem em climas quentes, tornando-os mais vulneráveis ao calor e suscetíveis a problemas de saúde.

Figura 43 – Consolidação da severidade total com os limites de resposta fisiológica dos ocupantes no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis



Fonte: a autora (2023)

Por fim, como recomendação geral para as três cidades analisadas, é a adoção de uma abordagem que combine sistemas construtivos leves, com transmitâncias térmicas menores que 2,37W/m²K nas paredes externas e 0,68W/m²K na cobertura. A adoção de telhado verde em regiões quentes e úmidas como Manaus, pode não ser tão eficaz para a redução dos impactos das mudanças climáticas, pelo fato do aumento da inércia térmica, no entanto, essa estratégia em climas como de Cuiabá, podem reduzir a severidade e a intensidade do evento de calor.

Além disso, recomenda-se a adoção de dispositivos de sombreamento do tipo brises, principalmente nas três cidades de análise. Essas medidas podem ser essenciais para enfrentar os desafios das mudanças climáticas que se esperam até o final do século e garantir ambientes internos mais confortáveis e seguros para os ocupantes, mesmo em face das crescentes temperaturas globais.

Os resultados obtidos estão em consonância com as recomendações das estratégias passivas de projeto estabelecidas na NBR 15.220 (ABNT, 2003). Conforme essa norma, em Manaus (ZB8) e Cuiabá, é recomendado o sombreamento das aberturas, enquanto em Florianópolis (ZB3), a ênfase recai na possibilidade de ventilação cruzada no verão. Portanto, os resultados corroboram com as recomendações das estratégias passivas de projeto da NBR 15.220 (ABNT, 2003), que indicam sombreamento das aberturas em Manaus e Cuiabá e ventilação cruzada no verão em Florianópolis. No entanto, é importante ressaltar que, devido aos impactos das mudanças climáticas, a implementação de sombreamento em Florianópolis torna-se fundamental para reduzir as elevadas temperaturas internas nas habitações.

Em relação as recomendações projetuais, da NBR 15.520 (ABNT, 2003) e NBR 15.575 (ABNT, 2021) apresentam que em Florianópolis e Manaus, as paredes externas devem apresentar transmitância térmica $\leq 3,70\text{W/m}^2\text{K}$ e Cuiabá de $\leq 2,20\text{W/m}^2\text{K}$, e a cobertura em Manaus a recomendação é que seja $\leq 2,30\text{W/m}^2\text{K}$ e em Cuiabá e Florianópolis de $\leq 2,00\text{W/m}^2\text{K}$. Os resultados obtidos se alinham com essas recomendações normativas. No entanto, é importante ressaltar que, considerando os impactos das mudanças climáticas, sistemas de cobertura com transmitâncias mais baixas e leves demonstram ser mais eficazes na redução das temperaturas internas. Dessa forma, sugere-se que as futuras atualizações das normativas brasileiras levem em consideração métricas para a avaliação do superaquecimento interno, bem como o impacto das alterações climáticas e das ondas de calor. Isso permitirá que as diretrizes construtivas sejam adaptadas de acordo com os desafios impostos pelas altas temperaturas.

5.3 ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO E IMPACTO AMBIENTAL NO PERÍODO HISTÓRICO E FUTUROS (2050 E 2080)

As simulações da capacidade, consumo energético para aquecimento e resfriamento e emissões de dióxido de carbono foram realizadas para duas tipologias construtivas, sendo a HISbase e HISenv6+bri+Tverde. Os resultados foram organizados de acordo com a sequência metodológica estabelecida no capítulo 4, abrangendo o período histórico, 2050 e 2080, para as cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis.

É importante destacar que a NBR 15.575 (ABNT, 2021) descreve que em simulações na condição condicionada artificialmente, o sistema de resfriamento e/ou aquecimento deve ser acionado nos períodos de ocupação dos ambientes de permanência prolongada. Portanto,

considerou-se, nesta pesquisa, o perfil de operação do sistema de ar-condicionado conforme a ocupação dos dormitórios 1 e 2, e da sala/cozinha (conjugada).

Além disso, o consumo energético de iluminação e equipamentos são fixos, independentemente da cidade, período e cenário analisado, totalizando valores anuais de 403kWh de iluminação e de 350,4kWh de equipamentos, os quais foram estabelecidos, conforme procedimento metodológico da NBR 15.575 (ABNT, 2021) e detalhados no Capítulo 3. Portanto, serão apresentados somente os consumos energéticos oriundos do sistema de ar-condicionado para resfriamento nas três cidades e aquecimento em Florianópolis, para o período histórico e futuro, considerando os três cenários de avaliação:

- i) HISbase_AC23: Tipologia HISbase com sistema de ar-condicionado do tipo *Split*, COP 3,23 e termostato de 23,0°C para resfriamento nas três cidades e 21,0°C para aquecimento em Florianópolis;
- ii) HISenv+bri+Tverde_AC23: Tipologia HISenv+bri+Tverde com sistema de ar-condicionado do tipo *Split*, COP 3,23 e termostato de 23,0°C para resfriamento nas três cidades e 21,0°C para aquecimento em Florianópolis;
- iii) HISenv+bri+Tverde_AC25: Tipologia HISenv+bri+Tverde com sistema de ar-condicionado do tipo *Split*, COP 3,23 e termostato de 25,0°C para resfriamento nas três cidades e 21,0°C para aquecimento em Florianópolis;

5.3.1 Capacidade de resfriamento e aquecimento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080)

A investigação das capacidades de resfriamento e aquecimento necessárias nos sistemas de ar-condicionado, para as tipologias HISbase e HISenv6+bri+Tverde em ambientes de permanência prolongada, baseou-se nas exposições diurna (2.190 horas) e noturna (4.380 horas) dos ocupantes nas habitações. Os resultados foram organizados considerando os períodos histórico, 2050 e 2080, nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis.

Além disso, considerou-se como referência de capacidade de resfriamento dos sistemas de ar-condicionado atuais, a planilha do INMETRO, intitulada “Condicionadores de ar – índices antigos (CEE)” (INMETRO, 2023), a qual apresenta os sistemas de ar-condicionado, a capacidade de refrigeração nominal em Btu/h e W para equipamentos na função frio/quente, o Coeficiente de Eficiência Energética (CEE) e a classe de desempenho. Portanto, com o intuito de investigar comparativamente a capacidade de resfriamento dos sistemas, selecionou-se dois equipamentos

que correspondem aos utilizados nos dias atuais nas residências, com um coeficiente de eficiência energética de 3,23 e capacidade de resfriamento de 2.600W (9.000Btu/h) e 3.500W (12.000Btu/h).

Em Florianópolis, a capacidade necessária para aquecimento diminuiu ao longo do tempo, chegando a 0W nos cenários climáticos futuros. No período histórico, essa capacidade representava apenas 8% no cenário HISbase_AC23, 10% no cenário HISenv6+bri+Tverde_AC23 e 11% no cenário HISenv6+bri+Tverde_AC25. Nos períodos de 2050 e 2080, essa capacidade representou 0% da necessidade total, indicando uma redução da necessidade de aquecimento devido às mudanças climáticas. Portanto, foram apresentados apenas os resultados referentes à capacidade de resfriamento. Além disso, a capacidade de resfriamento nos dormitórios 1 e 2 apresentou comportamento semelhante nas cidades analisadas, cenários e períodos histórico e futuros, com valores mais altos durante a exposição noturna, que é o período com maior ocupação.

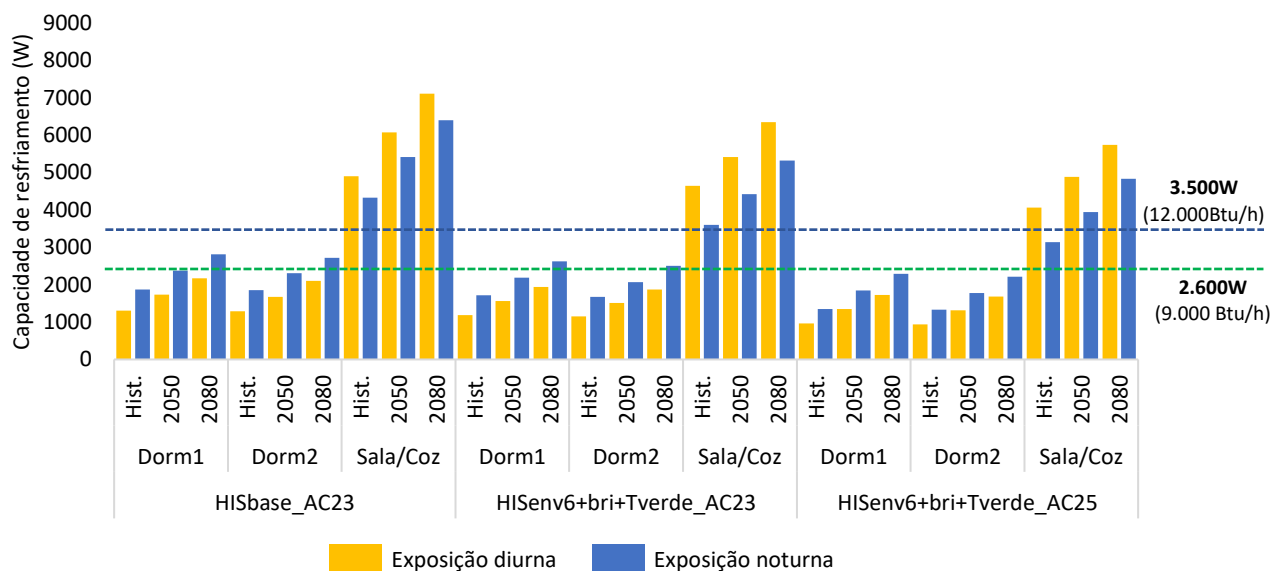
Em Manaus, no período histórico, a capacidade de resfriamento necessária nos dormitórios durante a exposição diurna e noturna foi, em média, de 1.299W e de 1.860W, respectivamente, no cenário HISbase_AC23. Com o aumento da temperatura em função de mudanças climáticas, a capacidade de resfriamento aumentou em +31% e +26% em 2050 e +65% e +49% em 2080, ultrapassando a capacidade de 2.700W nos dormitórios no cenário HISbase_AC23. Na sala/cozinha, a capacidade necessária no período histórico foi de 4.905W durante a exposição diurna e de 4.325W durante a exposição noturna, aumentando em +24% e +25% em 2050 e +35% em 2080, respectivamente (Figura 43). Ressalta-se que os maiores valores de capacidade nos dormitórios ocorreram no período noturno, enquanto na sala/cozinha, foi durante o período diurno, de acordo com a ocupação de cada ambiente.

Com a implementação de melhorias na envoltória, dispositivos de sombreamento e telhado verde (HISenv6+bri+Tverde_AC23), a capacidade de resfriamento nos dormitórios reduziu em -10% no período histórico, em ambos os períodos de exposição, e em -12% em 2050 e 2080 durante a exposição diurna, e em -8% durante a exposição noturna, em comparação com o cenário HISbase_AC23. Na sala/cozinha, essa redução foi relativamente maior, atingindo -6% no período histórico e -12% em 2050 e 2080 durante a exposição diurna, e de -17% durante a exposição noturna, em comparação com o cenário HISbase_AC23 (Figura 43). Neste contexto, observa-se que a implementação de estratégias bioclimáticas nas edificações reduziu a capacidade de resfriamento dos sistemas de ar-condicionado, indicando ambientes internos com temperaturas mais amenas e impactando no dimensionamento dos sistemas de ar-condicionado.

Com o aumento da temperatura de termostato de resfriamento de 23,0°C para 25,0°C (HISenv6+bri+Tverde_AC25), a capacidade necessária reduziu nos dormitórios em -28%, -23% e 20% no período histórico, 2050 e 2080, durante ambas as exposições, em comparação com o cenário HISbase_AC23. Na sala/cozinha, essa redução ultrapassou -30% durante a exposição noturna no período de 2080. Observa-se que, com o aumento de 2,0°C no termostato, a capacidade necessária em 2080 é a mesma que no período histórico no cenário HISbase_AC23 na sala/cozinha (Figura 43).

Analisando comparativamente com os sistemas de ar-condicionado utilizados atualmente, a Figura 43 evidencia que equipamentos de 9.000Btu/h seriam adequados para atender os dormitórios até o ano de 2050 nas tipologias HISbase_AC23 e HISenv6+bri+Tverde_AC23. No entanto, ao elevar o termostato para 25,0°C, esses sistemas seriam suficientes até o ano de 2080. Quanto à sala/cozinha, a necessidade de equipamentos de maior potência reflete a área do ambiente. No entanto, na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25, conforme ilustrado na Figura 43, durante a exposição noturna, um equipamento de 12.000Btu/h seria capaz de atender à sala/cozinha, enquanto durante a exposição diurna, a diferença entre as potências necessárias e as dos sistemas atuais seria de apenas 500W.

Figura 44 – Capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



Fonte: a autora (2023)

Em Cuiabá, a capacidade de resfriamento apresentou valores mais altos em comparação com Manaus, principalmente, durante a exposição noturna. No cenário HISbase_AC23, a capacidade necessária nos dormitórios e sala/cozinha foi de 1.189W e 5.531W durante a exposição

diurna, e noturna de 2.075W e 4.363W, respectivamente (Figura 44). No entanto, nos cenários climáticos futuros, a capacidade de resfriamento nos dormitórios aumentou em +39% e +26% no cenário de 2050 e +72% e 52% no cenário de 2080, durante as exposições diurnas e noturnas, respectivamente. Na sala/cozinha, esse aumento foi de 26% e 27% em 2050 e de 52% em 2080. Neste contexto, a capacidade de resfriamento necessária em 2080 na sala/cozinha ultrapassou 8.300W durante a exposição diurna, a fim de manter a temperatura do ambiente em torno de 23,0°C (Figura 44).

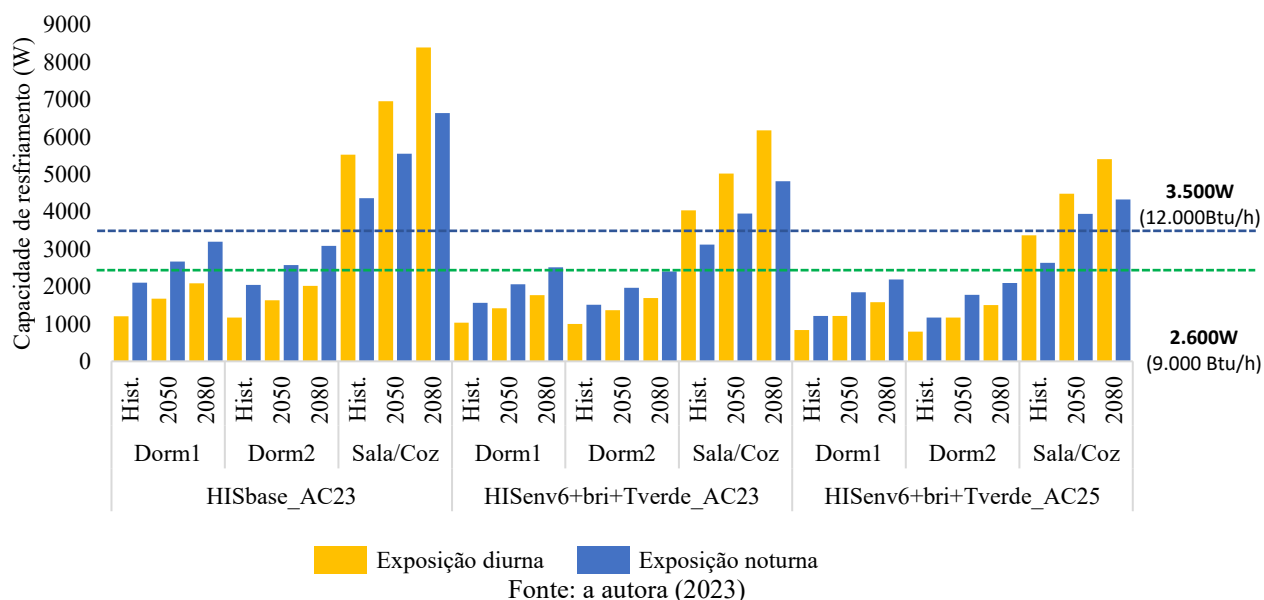
No cenário HISenv6+bri+Tverde_AC23, a capacidade de resfriamento reduziu em todos os ambientes. Na sala/cozinha, as reduções foram maiores em relação aos cenários HISbase_AC23, atingindo -27% e -28% no período histórico, -29% em 2050 e -28% em 2080, durante a exposição diurnas e noturnas, respectivamente, em comparação com o cenário HISbase_AC23 (Figura 44). Assim, a capacidade necessária em 2080 no cenário HISenv6+bri+Tverde_AC23 foi de 6.180W e 4.814W, ou seja, reduziu em +1800W tanto durante a exposição diurna quanto a noturna. Nos dormitórios, a redução da capacidade de resfriamento em comparação com o cenário HISbase_AC23 foi de -14% e -26% no período histórico, -16% e -23% em 2050 e -12% e -22% em 2080, durante as exposições diurnas e noturnas, respectivamente.

Com o termostato de resfriamento operando em 25,0°C, no período histórico, a capacidade de resfriamento nos dormitórios não ultrapassou 900W durante a exposição diurna. Nos cenários de 2050 e 2080, a capacidade média foi de 1.190W e 1.542W, respectivamente. Portanto, em comparação com o cenário HISbase_AC23, houve uma redução de -31%, -28% e -25% durante a exposição diurna nos períodos histórico, 2050 e 2080, e de -42%, -31% e -32% durante a exposição noturna, nos mesmos períodos (Figura 44). Na sala/cozinha, essa redução ultrapassou 55% no período histórico durante ambas as exposições. No entanto, em 2080, a capacidade necessária de resfriamento foi de 5.407W durante a exposição diurna e 4.332W durante a exposição noturna, ou seja, menor do que a capacidade necessária de resfriamento no cenário HISbase_AC23 no período histórico.

Na Figura 44, observa-se que os sistemas de ar-condicionado de 9.000Btu/h, comumente utilizados, seriam suficientes para atender os dormitórios até o período de 2080 nas tipologias que incorporam estratégias passivas de projeto (HISenv6+bri+Tverde_AC23) e que operam com o termostato de resfriamento ajustado a 25,0°C (HISenv6+bri+Tverde_AC25). No entanto, na HISbase_AC23, o sistema seria adequado apenas para o período histórico, tornando-se necessária uma ampliação da capacidade nos cenários climáticos futuros. No que diz respeito à sala/cozinha,

somente na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25, durante o período histórico, um sistema de 12.000Btu/h seria suficiente para atender ao ambiente. Nos demais cenários e tipologias há necessidade de um sistema com capacidades superiores.

Figura 45 – Capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá



Em comparação com as demais cidades analisadas, Florianópolis apresentou capacidade de resfriamento necessária relativamente baixa nos dormitórios. No cenário HISbase_AC23, no período histórico, foram necessários 918W durante a exposição diurna e 1.418W durante a exposição noturna. Com o aumento da temperatura interna nos cenários climáticos futuros, a capacidade de resfriamento aumentou em +33% em 2050 e +45% em 2080 para ambas as exposições (Figura 45). Entretanto, na sala/cozinha, a capacidade necessária de resfriamento ultrapassou 6.200W e 4.900W em 2080 durante a exposição diurna e noturna, respectivamente.

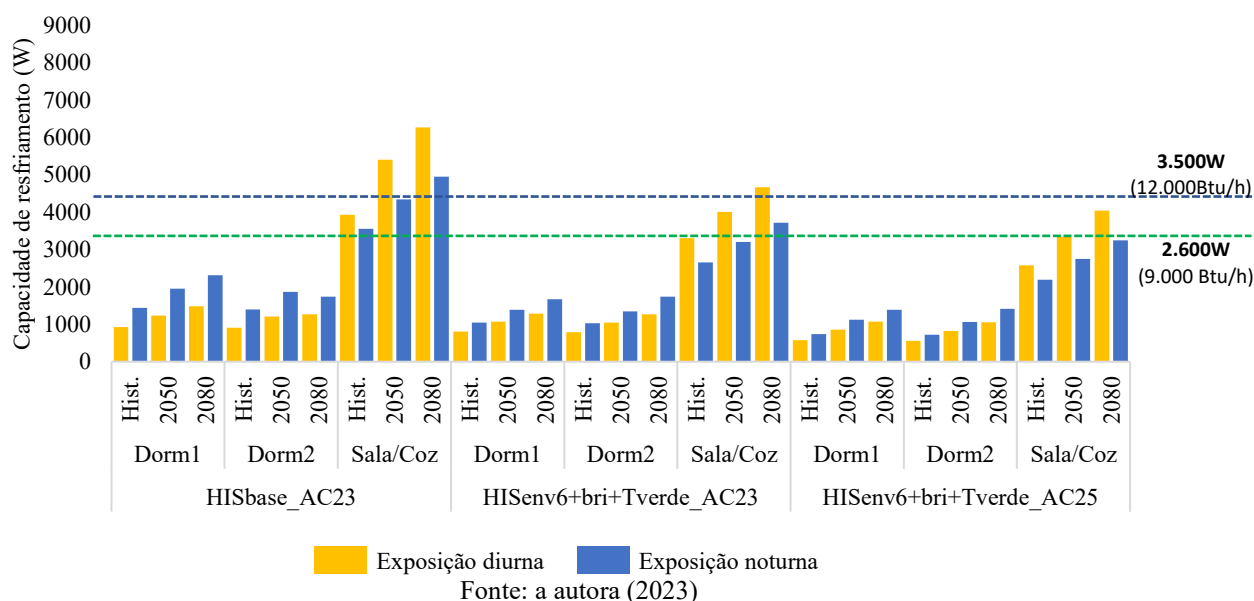
Considerando o cenário HISenv6+bri+Tverde_AC23, a capacidade de resfriamento necessária nos dormitórios reduziu no período histórico, 2050 e 2080 em -13% durante a exposição diurna. Durante a exposição noturna em -29% no período histórico e 2050, e em -16% em 2080 (Figura 45). Na sala/cozinha, essas reduções foram em torno de -26% em todos os períodos analisados e em ambas as exposições.

Na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25, nos dormitórios, a capacidade de resfriamento necessária no período histórico reduziu para 572W (-38%) durante a exposição diurna e noturna para 738W (-48%), chegando a valores de 1.060W e 1.400W em 2080, reduzindo em torno de -23% e -31%, respectivamente, em comparação com HISbase_AC23. Na sala/cozinha, a redução

da capacidade de resfriamento necessária, com o aumento do termostato, ultrapassou 50% durante a exposição noturna no período histórico e 48% durante a exposição diurna no período de 2080, em comparação com o cenário HISbase_AC23.

Na Figura 45, observa-se que os sistemas de ar-condicionado de 9.000Btu/h, utilizados nos dias atuais, seriam capazes de atender os dormitórios até o período de 2080 em todas as tipologias. Em relação à sala/cozinha, esse sistema atenderia até o período de 2050 na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 e no período histórico na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC23. Contudo, seria necessário aumentar a capacidade para 12.000Btu/h no período de 2080 e 2050, respectivamente. No caso da tipologia padrão, um sistema de 12.000Btu/h atenderia somente o período histórico, exigindo sistemas com capacidade superior para atender aos períodos futuros.

Figura 46 – Capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis



Diante dos resultados apresentados e com o objetivo de investigar o consumo energético, foram identificadas as maiores capacidades de resfriamento necessárias nos dormitórios e na sala/cozinha, visando dimensionar um sistema de condicionamento de ar capaz de atender aos dois períodos de exposição dos ocupantes (Tabela 36).

Por fim, é evidente que, diante dos impactos das mudanças climáticas, as capacidades de resfriamento dos sistemas de ar-condicionado em Manaus, no cenário HISbase_AC23, aumentarão em +51% nos dormitórios e +45% na sala/cozinha até 2080. Portanto, os sistemas atualmente dimensionados podem se tornar insuficientes para manter os ambientes em níveis aceitáveis nos cenários climáticos futuros. A implementação de estratégias bioclimáticas na habitação

demonstrou ser eficaz na redução da capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado em até 11% em Manaus. No entanto, com o aumento do termostato de resfriamento, essa redução é de -19% em 2080, em comparação com o cenário HISbase_AC23, representando uma diminuição de +1.300W (Tabela 36).

Cuiabá devido ao seu clima caracteristicamente quente e baixa umidade, mesmo durante o período noturno, apresentou as maiores demandas de capacidade de resfriamento para o sistema de ar-condicionado, atingindo até 8.397W na sala/cozinha em 2080. Neste contexto, com os impactos das mudanças climáticas, o aumento da capacidade de resfriamento nos dormitórios e na sala/cozinha é semelhante ao observado em Manaus, superando +50% em 2080 no cenário HISbase_AC23 (Tabela 36).

No entanto, ao elevar o termostato de resfriamento para 25,0°C, a redução dessa capacidade no cenário de 2080 foi superior a +30%. Assim, a capacidade necessária em 2080 no cenário HISenv6+bri+Tverde é comparável à capacidade necessária no período histórico no cenário HISbase_AC23 (Tabela 36). Portanto, ajustar o termostato de resfriamento e implementar estratégias passivas de projeto podem tornar o sistema de condicionamento eficaz em cenários climáticos futuros, principalmente diante do aumento das temperaturas decorrentes das mudanças climáticas.

Em Florianópolis, as demandas de capacidade de resfriamento para os ambientes de permanência prolongada são relativamente menores em comparação com cidades de clima quente. No entanto, com os impactos das mudanças climáticas, observa-se um aumento da capacidade de resfriamento nos cenários HISbase_AC23, com um acréscimo de +61% nos dormitórios e +59% na sala/cozinha, representando um aumento de cerca de +2.330W na sala/cozinha (Tabela 36). Assim como em Cuiabá, a combinação do ajuste do termostato de resfriamento e a implementação de estratégias passivas de projeto reduziu a necessidade de capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado em +35% no período de 2080, em comparação com o cenário HISbase_AC23.

Tabela 36 – Resumo da diferença da capacidade de resfriamento do sistema de ar-condicionado entre os cenários nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080)

	Ambientes	Cenários	Capacidade de resfriamento por período (W)		
			Hist.	2050	2080
Manaus	Dormitórios	HISbase AC23	1.868	2.373	2.816
		HISenv6+bri+Tverde AC23	1.715	2.192	2.626
		HISenv6+bri+Tverde AC25	1.350	1.844	2.288
		*Δcapacidade	-28%	-22%	-19%
	Sala	HISbase AC23	4.904	6.072	7.105
		HISenv6+bri+Tverde AC23	4.641	5.418	6.351
HISenv6+bri+Tverde AC25		4.059	4.885	5.737	
	*Δcapacidade	-17%	-20%	-19%	
Cuiabá	Dormitórios	HISbase AC23	2.107	2.670	3.203
		HISenv6+bri+Tverde AC23	1.564	2.061	2.514
		HISenv6+bri+Tverde AC25	1.217	1.844	2.193
		*Δcapacidade	-42%	-31%	-32%
	Sala	HISbase AC23	5.531	6.954	8.397
		HISenv6+bri+Tverde AC23	4.034	5.018	6.180
HISenv6+bri+Tverde AC25		3.368	4.487	5.407	
	*Δcapacidade	-39%	-35%	-36%	
Florianópolis	Dormitórios	HISbase AC23	1.437	1.954	2.315
		HISenv6+bri+Tverde AC23	1.047	1.384	1.737
		HISenv6+bri+Tverde AC25	738	1.119	1.414
		*Δcapacidade	-49%	-43%	-39%
	Sala	HISbase AC23	3.930	5.405	4.664
		HISenv6+bri+Tverde AC23	3.302	4.009	4.664
HISenv6+bri+Tverde AC25		2.577	3.336	4.045	
	*Δcapacidade	-34%	-38%	-13%	

* Diferença entre as capacidades de resfriamento das tipologias HISbase_AC23 e HISenv6+bri+Tverde_AC25
Fonte: a autora (2023)

5.3.2 Estimativa do consumo de energia elétrica do período histórico e futuros (2050 e 2080)

Os consumos de energia elétrica foram quantificados para as tipologias HISbase e HISenv6+bri+Tverde, com base nas exposições diurna (2.190 horas) e noturna (4.380 horas) dos ocupantes, conforme descrito no capítulo 4. Como mencionado, o consumo energético de iluminação e equipamentos é fixo, independentemente da cidade, período e cenário analisado.

Portanto, neste contexto, serão apresentados apenas os resultados relativos ao consumo energético do sistema de ar-condicionado dos ambientes de permanência prolongada. As capacidades de resfriamento e aquecimento utilizadas nas simulações de consumo energético foram dimensionadas, conforme detalhado no capítulo 4 e estão apresentadas na Tabela 36.

Em Florianópolis, o consumo energético para aquecimento representa 8% e 15% do consumo energético total da habitação no período histórico, 1% e 2% em 2050 e 0% em 2080 nos cenários HISbase_AC23 e HISenv6+bri+Tverde, respectivamente. Assim, observa-se uma redução do consumo de aquecimento devido às mudanças climáticas, alcançando valores nulos em 2080. Portanto, serão apresentados apenas os resultados referentes à capacidade de resfriamento. Os

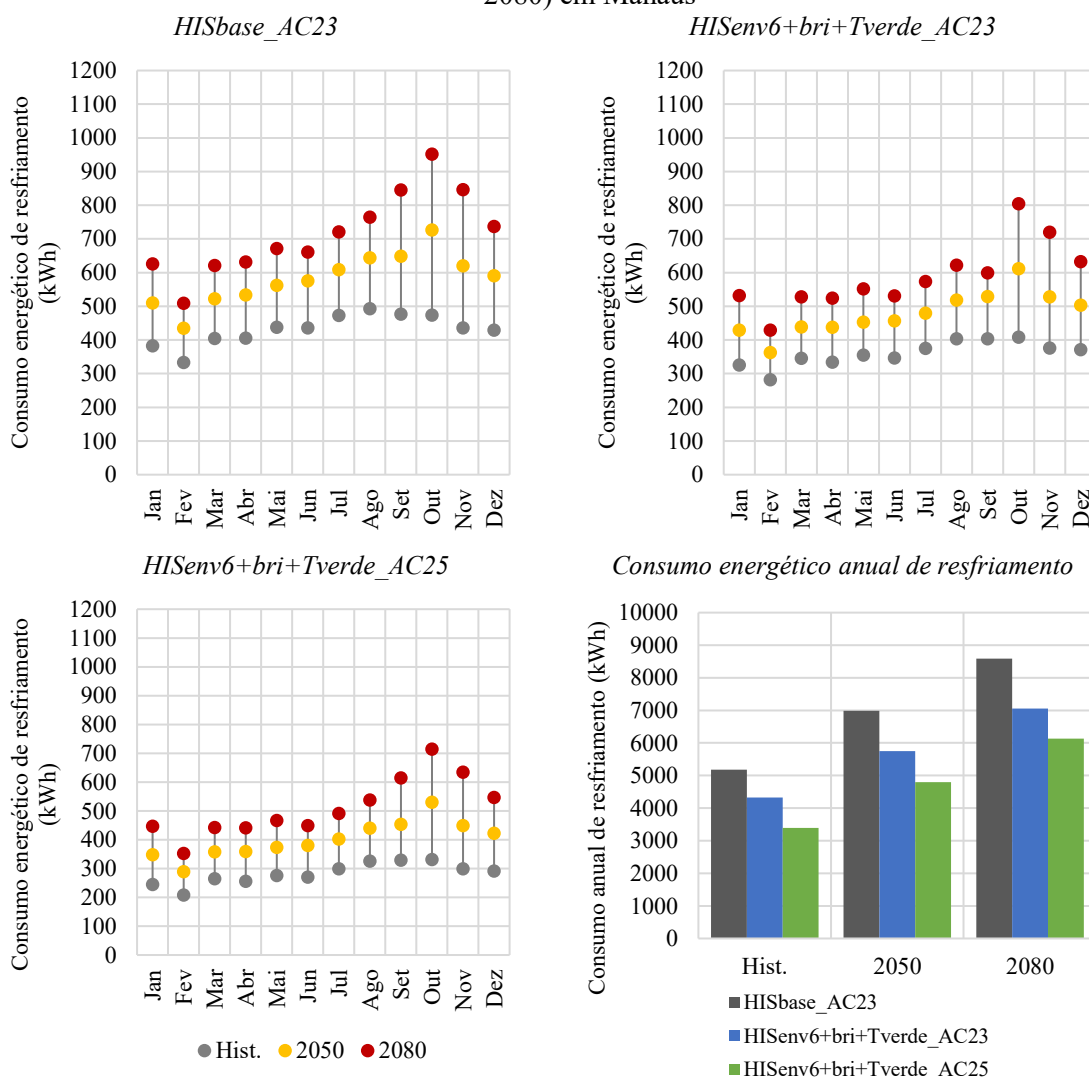
resultados foram organizados considerando os períodos históricos, 2050 e 2080, nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis.

Em Manaus, o consumo energético anual para resfriamento no período histórico foi de 5.184kWh no cenário HISbase_AC23, aumentando em +35% em 2050 e +66% em 2080. Com a melhoria na envoltória e implementação dos dispositivos de sombreamento e telhado verde, tipologia HISenv6+bri+Tverde, o consumo energético anual para resfriamento no período histórico foi de 4.330kWh, apresentando uma redução de -16% em comparação com o cenário HISbase_AC23. Nos cenários de 2050 e 2080, essa redução foi de -18%. Com o aumento do termostato para 25,0°C, o consumo energético anual para resfriamento reduziu em -35% no período histórico, -31% em 2050 e -29% em 2080, em comparação com o cenário HISbase_AC23, representando uma redução anual de cerca de -2.452kWh (Figura 46).

Observa-se que o consumo energético para resfriamento ultrapassa 400kWh nos meses de março a dezembro no cenário HISbase_AC23 e nos meses de agosto a outubro no cenário HISenv6+bri+Tverde_AC23, no período histórico. No cenário HISenv6+bri+Tverde_AC25, o consumo energético para resfriamento não ultrapassa 330kWh. Esse comportamento está correlacionado com os meses caracterizados como os mais quentes em Manaus, nos quais as temperaturas médias mensais externas excedem a 27,5°C, nesses meses (Figura 46).

No entanto, diante dos impactos das mudanças climáticas, as temperaturas médias mensais externas aumentam, superando 32,0°C em 2050 e 37,0°C em 2080 em outubro. Consequentemente, o consumo energético para resfriamento nesse período aumenta para 727,2kWh e 952,0kWh, respectivamente, apresentando os maiores valores mensais no cenário HISbase_AC23. Considerando a tipologia HISenv6+bri+Tverde e o aumento do termostato para 25,0°C, esse consumo reduz para 611kWh e 530kWh em 2050 e 804kWh e 713Kwh em 2080, respectivamente (Figura 46).

Figura 47 – Consumo energético para resfriamento das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus



Fonte: a autora (2023)

Em Cuiabá, o consumo anual de energia para resfriamento período histórico foi de 4.960kWh, aumentando para 6.824kWh (+38%) em 2050 e para 8.551kWh em 2080 (+72%) na tipologia HISbase_AC23. Na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC23, observa-se uma redução no consumo energético anual para resfriamento de -29% no período histórico e -27% nos períodos de 2050 e 2080. Assim, o consumo anual em 2080 é de 6.340kWh, sendo semelhante ao período de 2050, em comparação com a tipologia HISbase_AC23. Com o aumento do termostato para 25,0°C, a tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 apresenta um consumo energético anual para resfriamento de 2.655kWh no período histórico, 3.996kWh em 2050 e 5.284kWh em 2080, obtendo uma redução de -46%, -41% e -38% em comparação com a tipologia HISbase_AC23 (Figura 47).

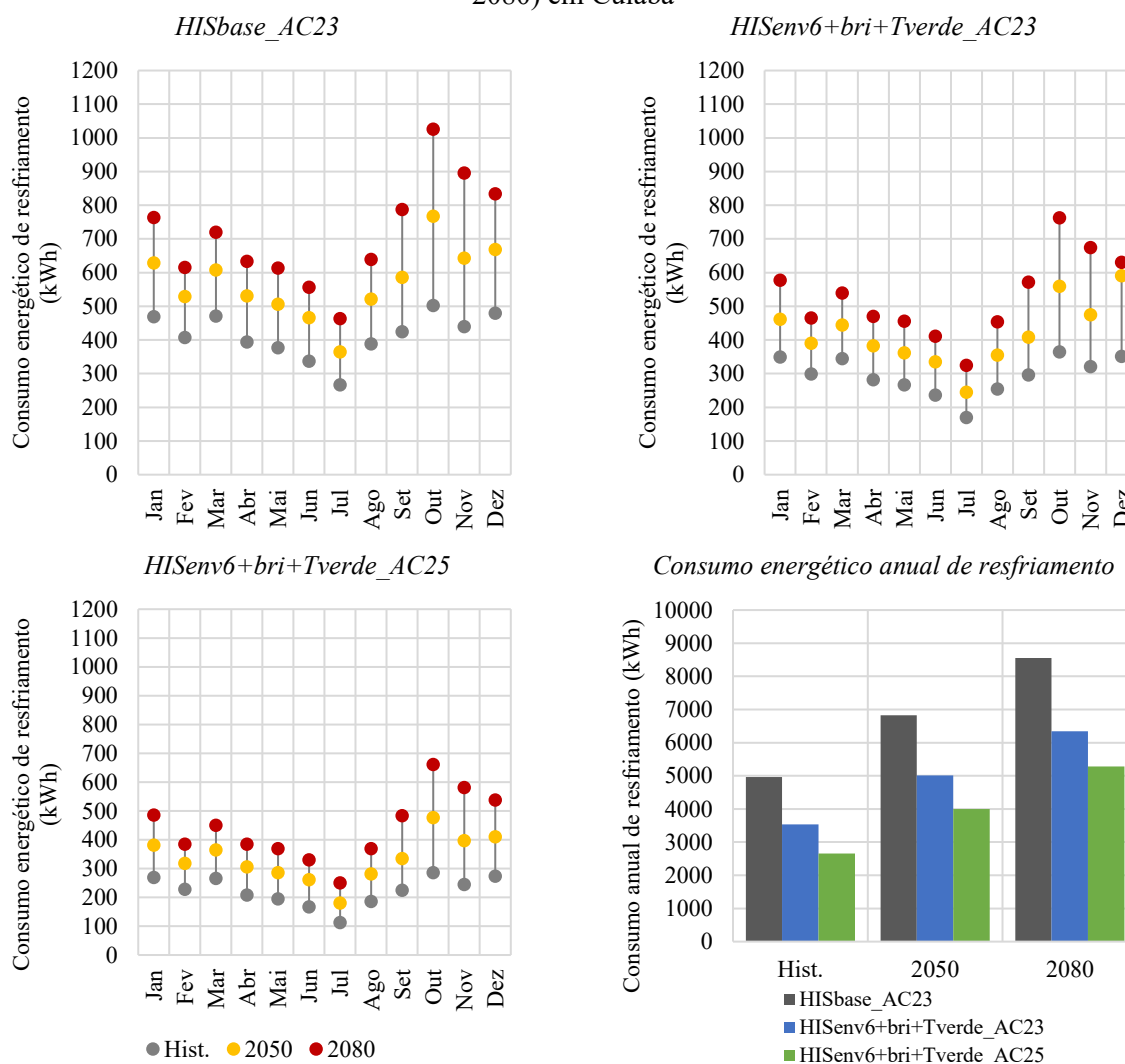
Correlacionado o consumo energético mensal para resfriamento com a temperatura média externa, observa-se que o mês de outubro apresenta os maiores valores em ambas as investigações.

No período histórico, outubro apresentou temperatura média de 28,8°C, enquanto em 2050 e 2080, essas médias sobem para 33,7°C e 38,4°C, respectivamente. Conseqüentemente, outubro apresentou os maiores valores de consumo energético para resfriamento no cenário HISbase_AC23, sendo de 502kWh, 767kWh e 1.026kWh nos mesmos períodos (Figura 47). Destaca-se que o aumento do consumo energético para resfriamento nesse mês e no cenário foi de +104% em 2080 em comparação com o período histórico.

Com a adaptação da habitação e o aumento do termostato para 25,0°C, observa-se uma redução no consumo energético para resfriamento no mês de outubro em torno de -27% na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC23 e de -36% na HISenv6+bri+Tverde_AC25 em 2080 em comparação com a tipologia HISbase_AC23. No entanto, destaca-se a efetividade das estratégias implementadas na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC23 para a redução do consumo energético para resfriamento, sendo no período de 2050 o consumo de 559kWh, enquanto na tipologia HISbase_AC23 no período histórico o consumo é de 502kWh.

Além disso, com o termostato operando com 2,0°C acima do recomendando pela NBR 15.575, a tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 apresenta consumo energético para resfriamento de 661kWh em 2080, apresentando somente 158kWh de diferença em relação ao consumo no período histórico da HISbase_AC23 (Figura 47). Assim, observa-se que em Cuiabá, a implementação das estratégias e o ajuste de operação do termostato do sistema de ar-condicionado podem ser eficazes para a redução do consumo energético para resfriamento e contribuir com a mitigação das mudanças climáticas.

Figura 48 – Consumo energético para resfriamento das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá



Fonte: a autora (2023)

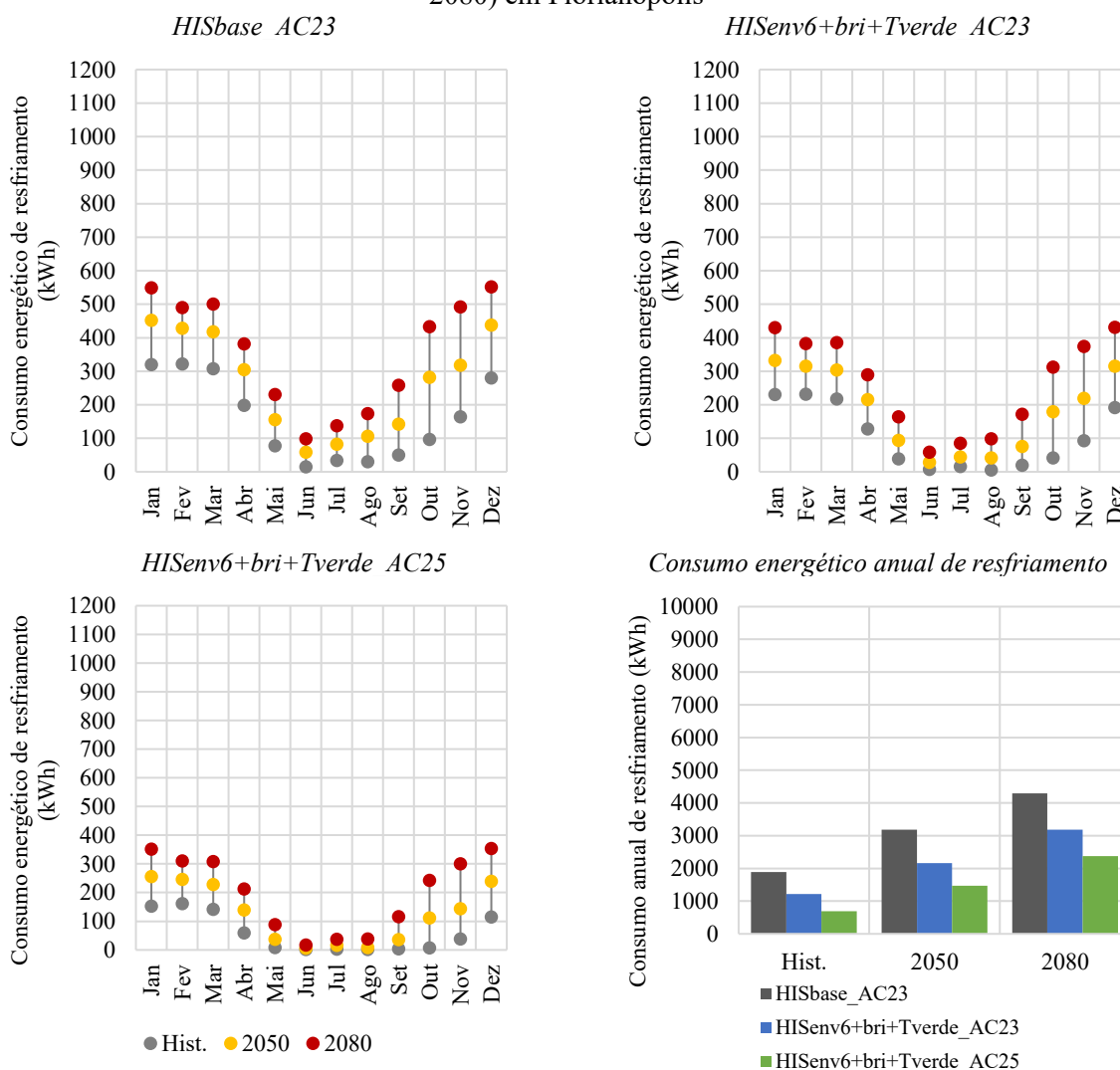
Em Florianópolis, o consumo energético anual para resfriamento na tipologia HISbase_AC23 é de 1.829kWh no período histórico, apresentando aumento de +68% em 2050 e +127% em 2080, totalizando um consumo energético para resfriamento de 3.181kWh e 4.294kWh, respectivamente (Figura 48). Na tipologia HISenv6+bri+Tverde, esse consumo é de 1.217kWh, 2.161kWh e 3.181kWh, nos mesmos períodos, respectivamente.

No entanto, com o impacto das mudanças climáticas, o aumento do consumo energético para resfriamento nesta tipologia representa +78% em 2050 e +161% em 2080 em comparação com o período histórico. Na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25, observa-se que o consumo energético para resfriamento no período histórico é de 695kWh, aumentando para 1.469kWh (+111%) em 2050 e para 2.377kWh (+242%) em 2080. No entanto, podem ser observadas reduções no consumo energético anual para resfriamento entre as tipologias, sendo no período de 2080 de -

26% e -45% nas tipologias HISenv6+bri+Tverde_AC23 e HISenv6+bri+Tverde_AC25, respectivamente, em comparação com a HISbase_AC23.

No mês de fevereiro, observam-se os maiores valores de consumo energético para resfriamento em Florianópolis, sendo na tipologia HISbase_AC23 de 321kWh, aumentando em +33% em 2050 e +52% em 2080. Com a adaptação da habitação, esse consumo reduz na tipologia HISenv6+bri+Tverde em -28% no período histórico, -26% em 2050 e -22% em 2080, em comparação com a HISbase_AC23.

Figura 49 – Consumo energético para resfriamento das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Florianópolis



Fonte: a autora (2023)

Assim, com a implementação das estratégias passivas de projeto, é possível obter uma redução do consumo energético de resfriamento de até 110kWh no mês mais quente (Figura 48). Na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25, observa-se que, com o ajuste do termostato de resfriamento para 25,0°C, a redução do consumo em fevereiro é de -50% no período histórico, -

42% em 2050 e -37% em 2080. Destaca-se que o consumo energético para resfriamento obtido, em 2080, no mês de fevereiro na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 é de 310kWh, ou seja, menor que o obtido no período histórico na tipologia HISbase_AC23, o qual é de 321kWh.

Por fim, observa-se que com os impactos das mudanças climáticas em regiões de clima quente, como Manaus e Cuiabá, onde já se registra um alto consumo energético para resfriamento no período histórico, resultam em aumentos alarmantes desse consumo nos cenários climáticos futuros, chegando a um aumento em torno de +3.000kWh em 2080. Esse mesmo comportamento é observado em regiões de clima mais ameno, como de Florianópolis.

No entanto, é importante destacar que a implementação de estratégias passivas de projeto e o ajuste do termostato de resfriamento para 25,0°C, com base no limite de neutralidade térmica ($SET \leq 26,0^\circ C$), possibilitam a redução significativa do consumo energético para resfriamento. Em Florianópolis, essa redução é de até 63% no período histórico e 45% em 2080. Além disso, o consumo obtido em Manaus, Cuiabá e Florianópolis, em 2080, na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25, é menor do que o obtido no período de 2050 na tipologia HISbase_AC23.

Além disso, destaca-se que o consumo energético para resfriamento em Manaus e Cuiabá corresponde a 86% no período histórico, 89% em 2050 e 91% em 2080 do consumo energético total da tipologia HISbase_AC23. No entanto, nas tipologias HISenv6+bri+Tverde_AC25, esse consumo corresponde a 81%, 86% e 88% em Manaus, e em Cuiabá, esse consumo é de 77%, 83% e 87%, para os mesmos cenários, em comparação com a tipologia HISbase_AC23.

Em Florianópolis, esse consumo corresponde a 63% no período histórico, 79% em 2050 e 84% em 2080, ou seja, mesmo em climas quentes, com os impactos das mudanças climáticas, o consumo do sistema de ar-condicionado para resfriamento é superior a 70% do consumo total da habitação. No entanto, com a adaptação da habitação, esse consumo reduz para 38%, 64% e 75%, na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 para os mesmos cenários, em comparação com a tipologia HISbase_AC23. Destaca-se que esse consumo está diretamente relacionado a operação do sistema de ar-condicionado, o qual opera com termostatos de 23,0°C e 25,0°C, sendo acionados durante a ocupação dos ambientes de permanência prolongada.

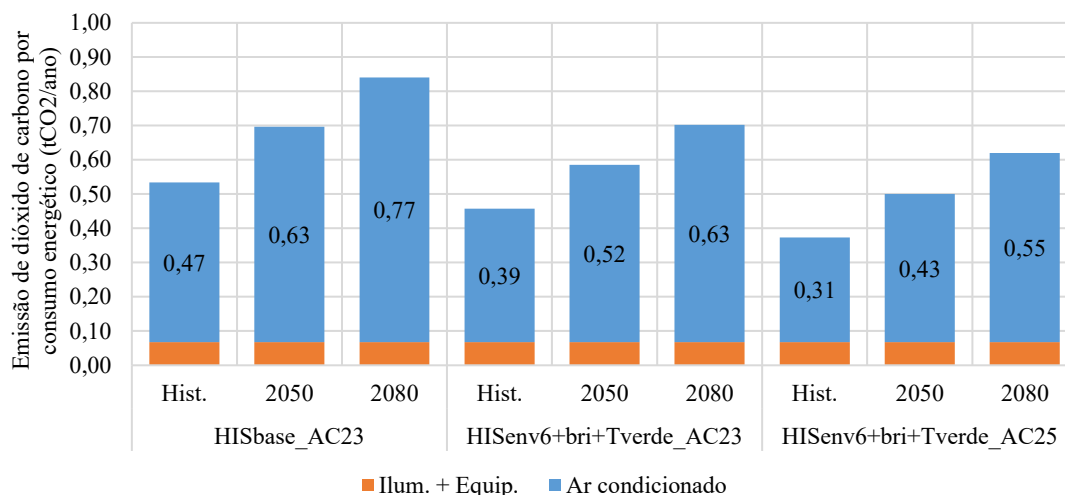
Dessa forma, fica evidente que o aumento de 2,0°C no termostato de resfriamento e a implementação de estratégias passivas de projeto nas habitações podem efetivamente contribuir para a redução do consumo energético de resfriamento, tanto em regiões de climas quentes como em climas amenos, desempenhando um papel importante na mitigação das mudanças climáticas.

5.3.2.1 Estimativa das emissões de dióxido de carbono decorrentes do consumo energético do sistema de ar-condicionado no período histórico e futuros (2050 e 2080)

A estimativa das emissões de dióxido de carbono para as tipologias HISbase e HISenv6+bri+Tverde baseou-se no consumo energético total, que inclui o consumo de iluminação, equipamentos, resfriamento e aquecimento, nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis. Destaca-se que foram investigados os três cenários definidos no capítulo 4 desta pesquisa: HISbase_AC23, HISenv6+bri+Tverde_AC23 e HISenv6+bri+Tverde_AC25. O fator de emissão de dióxido de carbono considerado foi de 0,090tCO₂/MWh (CB3E, 2020). Neste contexto, os consumos energéticos de iluminação e equipamentos são fixos, totalizando 753,4kWh em todas as cidades, períodos e cenários analisados, resultado em emissões de dióxido de carbono 0,07tCO₂/ano. Os resultados foram organizados considerando os períodos histórico, 2050 e 2080.

Em Manaus, a emissão de dióxido de carbono decorrente do sistema de resfriamento é de aproximadamente 0,47tCO₂/ano, aumentando em +35% em 2050 e +66% em 2080 na tipologia HISbase_AC23. No entanto, a tipologia HISenv6+bri+Tverde apresentou uma redução das emissões de dióxido de carbono de -18% em todos os períodos em comparação com a tipologia HISbase_AC23. Ao considerar um aumento no termostato, o período de operação do sistema de ar-condicionado reduz, conseqüentemente, o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono. Assim, comparando a tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 com a HISbase_AC23, observa-se uma redução nas emissões de -35% no período histórico, -31% em 2050 e -29% em 2080, sendo uma redução de 0,22tCO₂/ano em 2080 (Figura 49).

Figura 50 – Emissões totais de dióxido de carbono por consumo energético das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Manaus

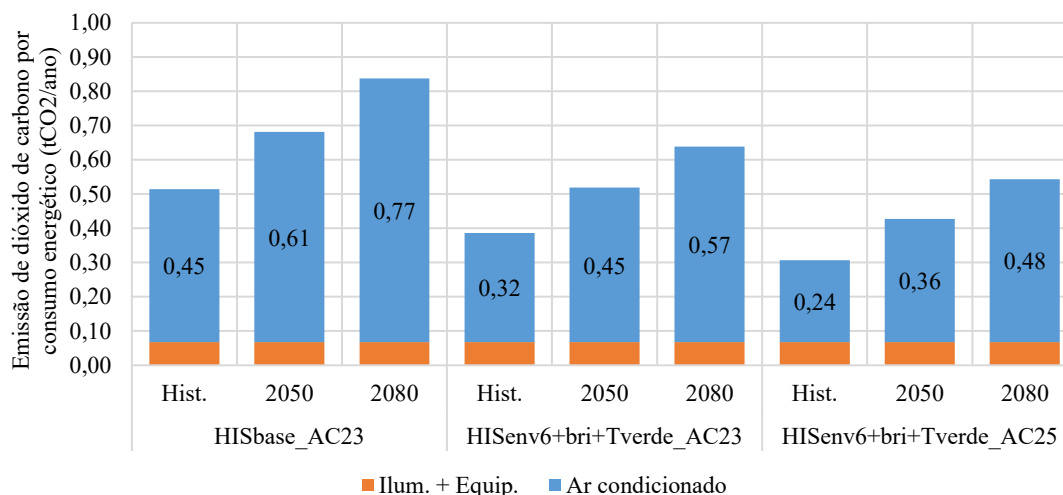


Fonte: a autora (2023)

As emissões de dióxido de carbono em Cuiabá apresentam comportamento semelhante ao de Manaus. Observa-se que a efetividade das estratégias passivas de projeto no tipo climático da região pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, apresentando diferenças entre as cidades de até 0,07 tCO₂/ano no período histórico e, em 2050 e 2080 nas tipologias HISenv6+bri+Tverde_AC23 e HISenv6+bri+Tverde_AC25 (Figura 50).

No entanto, as emissões de dióxido de carbono na tipologia HISbase_AC23 oriundas do sistema de resfriamento no período histórico são de 0,45tCO₂/ano, aumentando em +38% em 2050 e +72% em 2080 (Figura 23-B). Essas emissões reduzem na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC23 em -29% no período histórico, -27% em 2050 e 2080, em comparação com a HISbase_AC23. Assim, observa-se que a redução da transmitância térmica e implementação das estratégias passivas de projeto podem ser eficazes para a redução das emissões em até 0,20tCO₂/ano em 2080. Entretanto, observa-se que o ajuste do termostato para 25,0°C pode contribuir para a redução das emissões oriundas do consumo energético para resfriamento em até -46% no período histórico, -41% em 2050 e -38% em comparação com a tipologia HISbase_AC23 (Figura 50).

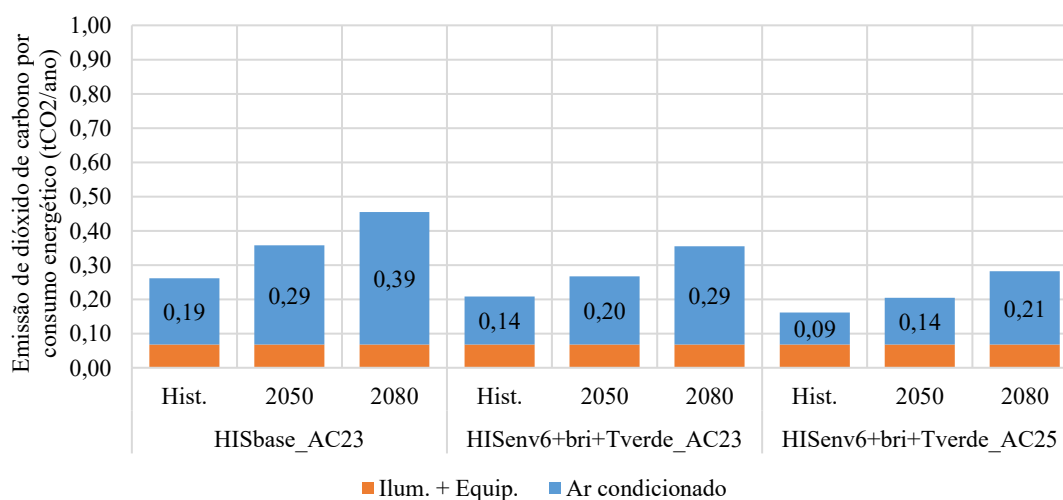
Figura 51 – Emissões totais de dióxido de carbono por consumo energético das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080) em Cuiabá



Fonte: a autora (2023)

Por fim, em Florianópolis, foram consideradas as emissões de dióxido de carbono oriundas da somatória do consumo energético para aquecimento e resfriamento dos cenários. Neste contexto, as emissões de dióxido de carbono foram de 0,19tCO₂/ano no período histórico, 0,29tCO₂/ano em 2050 e 0,39tCO₂/ano em 2080, apresentando um aumento de 100% em 2080 em comparação com o período histórico. No entanto, as emissões reduzem com a adaptação da habitação, sendo na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 de 0,09tCO₂/ano no período histórico, 0,14tCO₂/ano em 2050 e 0,21tCO₂/ano em 2080, assim, observa-se uma redução de -52%, -53% e -45% em comparação com a tipologia HISbase_AC23, respectivamente (Figura 51).

Figura 52 – Emissões totais de dióxido de carbono por consumo energético das tipologias nos períodos histórico e futuros (2050 e 2080)



Fonte: a autora (2023)

Assim, observa-se que a adoção de estratégias passivas de projeto em edificações residenciais pode ter um impacto significativo na redução das emissões de dióxido de carbono. Nas cidades de Manaus e Cuiabá, em que o consumo energético de resfriamento é um fator relevante, a tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC23 demonstrou uma notável diminuição nas emissões em comparação com a HISbase_AC23, destacando-se especialmente, em 2080, com uma redução de $-0,22\text{tCO}_2/\text{ano}$.

Além disso, a otimização do termostato para $25,0^\circ\text{C}$ desempenhou um papel crucial na redução das emissões de dióxido de carbono relacionadas ao consumo de energia para resfriamento. Em Florianópolis, a adaptação da habitação na tipologia HISenv6+bri+Tverde_AC25 resultou em uma redução significativa de até 53% nas emissões de CO_2 em 2050 e 45% em 2080, em comparação com a HISbase_AC23. Esses resultados destacam a importância de considerar estratégias sustentáveis na construção de edifícios para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa se propôs a investigar as condições térmicas internas de um edifício multifamiliar, considerando os impactos das mudanças climáticas, com a finalidade de identificar a vulnerabilidade dos ocupantes e avaliar o potencial de estratégias passivas de projeto como medidas de adaptação.

Nesse contexto, os efeitos das mudanças climáticas, decorrentes do aquecimento global, resultaram em ambientes internos mais quentes, tornando os ocupantes propícios a vulnerabilidade. Esse impacto está diretamente relacionado ao aumento da temperatura de bulbo seco em $+4,8^{\circ}\text{C}$ nas cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis, bem como à redução da umidade relativa do ar em até -11% em Manaus, -7% em Cuiabá e $-8,5\%$ em Florianópolis até 2080. Esses aumentos são preocupantes, uma vez que a combinação de altas temperaturas e baixa umidade relativa pode favorecer a ocorrência de condições extremamente quentes, aumentando os riscos para a saúde dos ocupantes.

Diante dos impactos, aprimorar a envoltória da habitação, com ênfase na redução da transmitância térmica da cobertura, resulta em uma diminuição da severidade e intensidade dos impactos durante a exposição diurna em 2080, nas três cidades analisadas. Essa redução é mais significativa durante a exposição noturna, que conta com uma ocupação mais prolongada, principalmente em climas de temperaturas mais amenas, como o de Florianópolis. Entretanto, em Manaus e Cuiabá, cidades de clima quente, as reduções não excedem -10% em 2080.

Nesse contexto, em virtude das condições climáticas rigorosas de Manaus, mesmo com a melhoria da envoltória, as temperaturas internas durante a exposição diurna e noturna permanecem acima de $29,5^{\circ}\text{C}$ e $32,0^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Isso evidencia que os ambientes não alcançam níveis de neutralidade térmica, tornando os ocupantes vulneráveis à situação de emergência na maioria das horas. No entanto, em comparação com Manaus, observa-se que essa primeira intervenção resulta em condições internas mais favoráveis em Cuiabá e Florianópolis, onde as temperaturas internas noturnas permanecem abaixo de $30,5^{\circ}\text{C}$ e $27,7^{\circ}\text{C}$, respectivamente, durante a exposição noturna.

Com a aplicação das estratégias passivas de projeto, observa-se que sua implementação de forma isolada não demonstra eficácia significativa na redução da severidade e intensidade dos eventos de calor, nem na diminuição das horas de vulnerabilidade nas três cidades analisadas. No entanto, quando combinadas, observam-se reduções mais substanciais. Em 2050, essas intervenções resultam em diminuições de até -24% na severidade e $-1,3^{\circ}\text{C}$ na intensidade em

Manaus, 44% na severidade e 1,3°C na intensidade em Cuiabá, e uma redução ainda mais notável em Florianópolis, atingindo valores de até -56% na severidade e 0,7°C na intensidade, em comparação com o período histórico. No entanto, em 2080, devido ao significativo aumento das temperaturas internas, a eficácia dessas estratégias reduz, não excedendo 10% de redução em Manaus, 20% em Cuiabá e 37% em Florianópolis durante as exposições diurnas e noturnas.

É relevante destacar que a estratégia de telhado verde, quando implementada de maneira isolada, em Manaus, resultou em um aumento da severidade, intensidade e no número de horas de situação de emergência durante as exposições diurnas em 2080. Isso torna os ambientes mais quentes, e sujeitos ao estresse térmico dos ocupantes, uma vez que as temperaturas efetivas padrão superaram os 35,0°C, levando os ocupantes a uma sensação térmica de sudorese profunda e até mesmo com risco de falha na termorregulação.

No entanto, durante a exposição noturna, essa estratégia não demonstrou uma eficácia significativa na redução dos impactos das mudanças climáticas nas condições térmica internas da habitação. Esse resultado pode ser atribuído ao aumento na transmitância e na capacidade térmica do sistema de cobertura, que leva ao fenômeno da inércia térmica. Destaca-se que existem diferenças entre as tipologias que consideram as estratégias passivas de projeto, e o telhado verde pode contribuir para o aumento da umidade do ar, o que, por sua vez, pode resultar em reduções nas temperaturas e na melhoria das condições internas dos ambientes, principalmente em climas quentes e secos, como em Cuiabá.

Com base nos resultados apresentados, torna-se evidente que, apesar da implementação das estratégias passivas de projeto, os ambientes internos permanecem aquecidos e sujeitos a horas de situação de emergência. Neste cenário, torna-se crucial o emprego de sistemas de condicionamento de ar para manter as condições internas da habitação em níveis adequados de conforto térmico. Esse padrão de comportamento se estende mesmo a regiões de climas amenos, como o de Florianópolis, principalmente diante dos impactos das mudanças climáticas futuras.

Ressalta-se que em regiões de clima quente, como Manaus e Cuiabá, onde já se registra um alto consumo energético para resfriamento no período histórico, em 2080 apresenta um aumento de +3.000 kWh. Esse valor representa mais de 80% do consumo energético total da habitação, considerando o termostato de resfriamento de 23,0°C. Em Florianópolis, o consumo energético histórico não ultrapassa 63%, mas com os impactos das mudanças climáticas, este valor se eleva para mais de 79% do consumo energético total. Essa perspectiva é alarmante, uma vez que o aumento do consumo energético contribui para as emissões de dióxido de carbono, agravando as

mudanças climáticas. Como resultado, as emissões de dióxido de carbono também aumentam proporcionalmente, ultrapassando 0,5 tCO₂/ano em Manaus, 0,8 tCO₂/ano em Cuiabá e 0,45 tCO₂/ano em Florianópolis no período de 2080.

Com a implementação de estratégias passivas de projeto e o ajuste do termostato de resfriamento para 25,0°C, observa-se uma redução no consumo energético para resfriamento. Além disso, o consumo obtido em Manaus, Cuiabá e Florianópolis em 2080 é menor do que o obtido no período de 2050 na tipologia padrão com o termostato de resfriamento ajustado para 23,0°C. Como resultado, as emissões de dióxido de carbono diminuem para 0,2 tCO₂/ano nos três períodos analisados em Cuiabá e Florianópolis, no entanto, em Manaus, permanecem em 0,5 tCO₂/ano.

Os resultados evidenciam que os impactos das mudanças climáticas elevam gradualmente a temperatura do ar e a radiação solar e reduz a umidade relativa do ar. Além disso, observou-se que as condições internas das habitações, que atualmente são construídas em larga escala no país, já estão sofrendo a influência das altas temperaturas nas regiões de Manaus e Cuiabá, apresentando baixa qualidade térmica em seu interior. A incorporação dos efeitos das alterações climáticas agrava ainda mais as condições atuais, contribuindo negativamente para o conforto térmico e, conseqüentemente, para a habitabilidade. Nas regiões de climas amenos, como Florianópolis, esse impacto aumenta a temperatura interna, tornando os ambientes mais quentes e expondo os ocupantes ao calor. Considerando que a capacidade dos ocupantes em tolerar altas temperaturas nessas regiões é menor em comparação com ocupantes que residem em climas quentes, torna-os mais vulneráveis ao calor e suscetíveis a problemas de saúde.

Embora as estratégias passivas de projeto sejam eficazes na redução desses impactos, sua efetividade não se estende até o final do século. Portanto, a utilização de sistemas de condicionamento de ar emerge como uma solução para manter as condições internas das habitações em níveis adequados de conforto térmico. No entanto, diante das projeções dos impactos, o uso desses sistemas ocorre ao longo de todo o ano, inclusive em climas amenos. Isso resulta em um aumento das emissões de dióxido de carbono decorrente desse consumo, contribuindo para agravar ainda mais as mudanças climáticas. Dessa forma, fica evidente que o aumento de 2,0°C no termostato de resfriamento e a implementação de estratégias passivas de projeto nas habitações podem efetivamente contribuir para a redução do consumo energético para resfriamento e das emissões de dióxido de carbono, tanto em regiões de climas quentes como em climas amenos, desempenhando um papel importante na mitigação das mudanças climáticas.

Assim, a pesquisa demonstra que a arquitetura não deve limitar-se apenas à melhoria da envoltória e ao cumprimento dos pré-requisitos normativos vigentes no Brasil, que se referem à transmitância e capacidade térmica. Acredita-se que é necessário ir além do desempenho mínimo, considerando a arquitetura bioclimática, com foco na implementação de estratégias passivas de projeto, para promover uma arquitetura que mantenha condições térmicas internas favoráveis ao bem-estar dos ocupantes, tanto nos dias atuais quanto nas projeções das mudanças climáticas futuras.

Além disso, sugere-se a necessidade de uma mudança de paradigmas nas normativas e regulamentos em vigor no Brasil. Isso inclui o estabelecimento de métricas que conduzam a uma análise das condições internas das edificações, com um enfoque na investigação da vulnerabilidade dos ocupantes. Essa análise não deve se restringir apenas às temperaturas internas, mas também considerar outras variáveis meteorológicas, como a umidade relativa do ar, que desempenha um papel fundamental no conforto térmico.

Recomenda-se também o estabelecimento de critérios específicos para a formulação de recomendações e diretrizes construtivas que levem em consideração situações de superaquecimento interno. O objetivo é criar ambientes que não favoreçam a vulnerabilidade dos ocupantes, mesmo diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Além disso, é importante promover a conscientização sobre o uso de termostatos de resfriamento do sistema de ar-condicionado em temperaturas mais elevadas. Essa ação pode contribuir significativamente para a redução das emissões de dióxido de carbono, desempenhando um papel relevante na mitigação das mudanças climáticas.

As pesquisas nessa temática, principalmente direcionadas para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, a busca pela resiliência das edificações e a investigação de sistemas construtivos e estratégias de projeto de baixo impacto ambiental são pouco difundidas no Brasil. Portanto, sugere-se para trabalhos futuros:

- i) Desenvolvimento de uma base de dados nacional contendo informações climáticas futuras para uso em simulações de desempenho de edificações;
- ii) Investigação de sistemas construtivos e estratégias de projeto inovadoras, que sejam ambientalmente mais sustentáveis e considerem as diferentes fases do ciclo de vida das edificações, com foco na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas;

- iii) Análise do impacto das áreas urbanas e suas características na influência sobre as condições internas das edificações, levando em consideração as projeções climáticas futuras;
- iv) Investigação aprofundada da mitigação das mudanças climáticas relacionadas ao consumo energético, com ênfase na utilização de sistemas de resfriamento eficientes e tecnologicamente avançados e
- v) Comparação e avaliação crítica de métricas utilizadas para a análise das condições térmicas internas das edificações, visando o desenvolvimento de normativas específicas para a avaliação do superaquecimento em edificações no contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação de Normas Técnicas. **NBR 15.575 – Edificações habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro. 2021.
- ABUSHARHA. Ali A.; PEARCE. E. Ian; FAGEHI. Raied. Effect of Ambient Temperature on the Human **Tear Film. Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice**. v. 42. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1097/ICL.0000000000000210>
- ADNAN. Mohammed Sarfaraz Gani; DEWAN. Ashraf; BOTJE. Dirk; SHAHID. Shamsuddin; HASSAN. Quazi K. Vulnerability of Australia to heatwaves: A systematic review on influencing factors. impacts. and mitigation Options. **Environmental Research**. v. 213. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113703>
- ALVES. Carolina Abrahão. A produção recente de edifícios residenciais em São Paulo: desempenho e conforto térmico no contexto urbano e climático em transição. Tese (Doutorado). **Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.16.2019.tde-31072019-171853>
- ALVES. Carolina Abrahão. Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo. Estudo de caso: desempenho térmico de edifícios residenciais para idosos. Dissertação (Mestrado). **Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo**. 2014. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.16.2015.tde-28082015-101646>
- ALVES. Carolina Abrahão; DUARTE. Denise Helena Silva; GONÇALVES. Fábio Luiz Teixeira. Residential buildings’ thermal performance and comfort for the elderly under climate changes context in the city of São Paulo. Brazil. **Energy and Buildings**. v. 114. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.044>
- ALVES. Carolina Abrahão; GONÇALVES. Fábio Luiz Teixeira; DUARTE. Denise Helena Silva. The recent residential apartment buildings’ thermal performance under the combined effect of the global and the local warming. **Energy and Buildings**. v. 238. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110828>
- ANDRÍC. Ivan; KOC. Muammer; AL-GHAMDI. Sami G. A review of climate change implications for built environment: Impacts. mitigation measures and associated challenges in developed and developing countries. **Journal of Cleaner Production**. v. 211. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.128>
- ARIFWIDODO. Sigit D.; CHANDRASIRI. Orana. Urban heat stress and human health in Bangkok. Thailand. **Environmental Research**. v. 185. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109398>
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. 2020. Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>. Acesso em: 03 mai. 2023
- ATTIA. Shady; LEVINSON. Ronnen; NDONGO. Eileen; HOLZER. Peter; KAZANCI. Ongun Berk; HOMAEL. Shabnam; ZHANG. Chen; OLESEN. Bjarne W.; QI. Dahai; HAMDY. Mohamed; HEISELBERG. Per. Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition. **Energy and Buildings**. v. 239. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95336-8.00014-7>
- ATTIA. Shady; MUSTAFA. Ahmed Mohamed El Saeid; MANOJ. Kumar. Assessment of thermal overheating in free-running buildings in Cairo. **Proceedings of the 1st international conference on**

comfort at the extremes: energy, economy and climate. 2019. Disponível em: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/234286>. Acesso em: 11 mai. 2023

AULICIEMS, A. Towards a psycho-physiological model of thermal perception. **Biometeorol.** v. 25.1981. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02184458>

AZHAR, Gulrez; SAHA. Shubhayu; GANGULY. Partha; MAVALANKAR. Dileep; MADRIGANO. Jaime. Heat Wave Vulnerability Mapping for India. **Int J Environ Res Public Health.** v. 14. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph14040357>

AZIZPOUR, F., MOGHIMI, S., SALLEH, E., MAT, S., LIM, C. H., SOPIAN, K. Thermal comfort assessment of large-scale hospitals in tropical climates: A case study of University Kebangsaan Malaysia Medical Centre (UKMMC). **Energy and Buildings**, 64, 317–322. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.05.033>

BABA, Fuad Mutasim; GE. Hu; WANG. Liangzhu; ZMEUREANU. Radu. Do high energy-efficient buildings increase overheating risk in cold climates? Causes and mitigation measures required under recent and future climates. **Building and Environment.** v. 219. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109230>

BAMDAD, K. Cool roofs: A climate change mitigation and adaptation strategy for residential buildings. *Building and Environment*, 236, 110271. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110271>

BAQA, Muhammad Fahad; LU. Linlin; CHEN. Fang; NAWAZ-UL-HUDA. Syed; PAN. Luyang; TARIQ. Aqil; QURESHI. Salman; LI. Bin; LI. Qingting. Characterizing Spatiotemporal Variations in the Urban Thermal Environment Related to Land Cover Changes in Karachi. Pakistan. from 2000 to 2020. **Remote Sensing.** v. 14. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14092164>

BAREA, G., VICTORIA MERCADO, M., FILIPPÍN, C., MONTEOLIVA, J. M., VILLALBA, A. New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments. *Energy and Buildings*, 266, 112100. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112100>

BAREA. Gustavo; MERCADO. Victoria; FILIPPÍN. Celina; MONTEOLIVA. Juan Manuel; VILLALBA. Ayelén. New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environment. **Energy and Buildings.** v. 266. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112100>

BARRIOPEDRO, David; FISCHER. Erich M.; LUTERBACHER. Jurg; TRIGO. Ricardo M.; GARCÍA-HERRERA. Ricardo. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. **Science.** v. 8. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1201224>

BASU. Rupa; SAMET. Jonathan M. An exposure assessment study of ambient heat exposure in an elderly population in Baltimore. Maryland. **Environ Health Perspect.** v. 110. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.021101219>

BECKMANN, S. K., HIETE, M., BECK, C. Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments—Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. *Climate Risk Management*, 32, 100286. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2021.100286>

BELCHER, S. E., HACKER, J. N., & POWELL, D. S. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(1), 49–61. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>

BELCHER. S.; HACKER. J.; POWELL. D. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology.** v. 26. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>

BIDASSEY-MANILAL. Shalin; WRIGHT. Caradee Y.; ENGELBRECHT. Jacobs C.; ALBERS. Patricia N.; GARLAND. Rebecca M.; MATOOANE. Mamopeli. Students' Perceived Heat-Health Symptoms Increased with Warmer Classroom Temperatures. **Int J Environ Res Public Health**. v. 7. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph13060566>

BIENVENIDO-HUERTAS, D. Influence of the type of thermostat on the energy saving obtained with adaptive setpoint temperatures: Analysis in the current and future scenario. *Energy and Buildings*, 244, 111024. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111024>

BIENVENIDO-HUERTAS. David; RUBIO-BELLIDO. Carlos; PÉREZ-FARGALLO. Alexis; PULIDO-ARCAS. Jesús. Energy saving potential in current and future world-built environments based on the adaptive comfort approach. **Journal of Cleaner Production**. v. 249. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119306>

BIENVENIDO-HUERTAS. David; SÁNCHEZ-GARCÍA. Daniel; RUBIO-BELLIDO Carlos. Influence of the RCP scenarios on the effectiveness of adaptive strategies in buildings around the world. **Building and Environment**. v. 208. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108631>

BORGHERO, L., CLÈRIES, E., PÉAN, T., ORTIZ, J., SALOM, J. Comparing cooling strategies to assess thermal comfort resilience of residential buildings in Barcelona for present and future heatwaves. *Building and Environment*, 231, 110043. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110043>

BRE. Facundo; MACHADO. Rayner M. Silva; LAWRIE. Linda K.; CRAWLEY. Drury B.; LAMBERTS. Roberto. Assessment of solar radiation data quality in typical meteorological years and its influence on the building performance simulation. **Energy and Buildings**. v. 250. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111251>

BURANYI, Stephen. The air conditioning trap: how cold air is heating the world. In: The Guardian, 2019. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2019/aug/29/the-air-conditioning-trap-how-cold-air-is-heating-the-world>. Acesso em: 28 abr. 2023.

BURMAN. Esfand; KIMPIAN. Judit; MUMOVIC. Dejan. Reconciling Resilience and Sustainability in Overheating and Energy Performance Assessments of Non-domestic Buildings. **Proceedings of the 2nd International Conference on Urban Sustainability and Resilience**. 2014. Disponível em: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1469753/>. Acesso em: 11 mai. 2023

CALAMA-GONZÁLEZ, C. M., LEÓN-RODRÍGUEZ, Á. L., SUÁREZ, R. Climate change mitigation: thermal comfort improvement in Mediterranean social dwellings through dynamic test cells modelling. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1–14. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/S40095-022-00498-1/FIGURES/11>

CAMPAGNA. Ludovica Maria; FIORITO. Francesco. On the Impact of Climate Change on Building Energy Consumptions: A Meta-Analysis. **Energies**. v. 15. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010354>

CASAGRANDE, B. G., & ALVAREZ, C. E. DE. (2013). Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. *Ambiente Construído*, 13(4), 173–187. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212013000400012>

CELLURA, M., GUARINO, F., LONGO, S., TUMMINIA, G. Climate change and the building sector: Modelling and energy implications to an office building in southern Europe. *Energy for Sustainable Development*, 45, 46–65. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2018.05.001>

CIANCIO, V., SALATA, F., FALASCA, S., CURCI, G., GOLASI, I., DE WILDE, P. Energy demands of buildings in the framework of climate change: An investigation across Europe. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102213. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102213>

- CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers. **TM59 Design methodology for the assessment of overheating risk in homes**. 2017. Disponível em: <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/technical-memorandum-59-design-methodology-for-the-assessment-of-overheating-risk-in-homes>. Acesso em: 02 mai. 2023.
- CRAWLEY. Drury B.; LAWRIE. Linda K. Rethinking the TMY: is the ‘Typical’ Meteorological Year Best for Building Performance Simulation? **Proceedings of the 14th IBPSA Conference**. 2015. DOI: <https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2707>
- DE DEAR. Richard; BRAGER. Gail; COOPER. D. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. **ASHRAE Transactions**. v.104. 1998. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>. Acesso em: 02 mai. 2023
- DHORDE. Amit G.; DESAI. Manasi S.; DHORDE. Anargha A.; KORADA. Mahendra S. Vulnerability of tropical Indian cities to augmenting heat stress during summer and monsoon season months (1969–2015). **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 134. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00897-3>
- DICKINSON. Robert; BRANNON. Benjamin. Generating future Weather files for resilience. **36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture**. 2016. Disponível em: <https://www.weathershift.com/Generating%20Future%20Weather%20Files.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2023
- DONGMEI, P., MINGYIN, C., SHIMING, D., MINGLU, Q. A four-node thermoregulation model for predicting the thermal physiological responses of a sleeping person. *Building and Environment*, 52, 88–97. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2011.12.020>
- DU, H., YANG, C. Re-visitation of the thermal environment evaluation index standard effective temperature (SET*) based on the two-node model. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101899. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101899>
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Uso de ar-condicionado no setor - residencial brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. **Nota Técnica EPE 030/2018**. 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 03 mai. 2023
- ESCANDÓN. Rocío; SUÁREZ. Rafael; ALONSO. Alicia; MAURO. Gerardo Maria. Is indoor overheating an upcoming risk in southern Spain social housing stocks? Predictive assessment under a climate change scenario. **Building and Environment**. v. 207. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108482>
- FAN. Xiaojun; LIU. Weiwei; WARGOCKI. P. Physiological and psychological reactions of subtropically acclimatized subjects exposed to different indoor temperatures at a relative humidity of 70%. **Indoor Air**. v. 29. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12523>
- FANG, Z., FENG, X., XU, X., ZHOU, X., LIN, Z., JI, Y. Investigation into outdoor thermal comfort conditions by different seasonal field surveys in China, Guangzhou. *International Journal of Biometeorology*, 63(10), 1357–1368. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/S00484-019-01752-8/TABLES/5>
- FANG, Z., ZHENG, Z., FENG, X., SHI, D., LIN, Z., GAO, Y. (2021). Investigation of outdoor thermal comfort prediction models in South China: A case study in Guangzhou. *Building and Environment*, 188, 107424. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107424>
- FANGER, P. O. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. 1970.

FÜRTÖN, B., SZAGRI, D., NAGY, B. The Effect of European Climate Change on Indoor Thermal Comfort and Overheating in a Public Building Designed with a Passive Approach. *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 2052, 13(12), 2052. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ATMOS13122052>

GAGGE, A. P., FOBELETS, A. P., BERGLUND, L. G. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological response. *Ci.Nii.Ac.Jp.* 1971. Disponível em: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10028129339>. Acesso em: 28 abr. 2023.

GAGGE, A. P., FOBELETS, A. P., BERGLUND, L. G. Standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92 (pt 2B), 1986.709–731.

GAMERO-SALINAS. Juan; MONGE-BARRIO. Aurora; KISHNANI. Nirmal; LÓPEZ-FIDALGO. Jesús; SÁNCHEZ-OSTIZ. Ana. Passive cooling design strategies as adaptation measures for lowering the indoor overheating risk in tropical climates. **Energy and Buildings**. v. 252. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111417>

GAO, B., ZHU, X., REN, J., RAN, J., KIM, M. K., LIU, J. Multi-objective optimization of energy-saving measures and operation parameters for a newly retrofitted building in future climate conditions: A case study of an office building in Chengdu. *Energy Reports*, 9, 2269–2285. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.01.049>

GAO, J., WANG, Y., WARGOCKI, P. Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings. *Building and Environment*, 92, 200–208. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.04.030>

GEIRINHAS. João L.; TRIGO. Ricardo M.; LIBONATI. Renata; COELHO. Caio A. S.; PALMEIRA. Ana Cristina. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **Climatol.** v. 38. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5294>

GUARDA. Emeli Lalesca Aparecida. Resiliência de habitação de interesse social unifamiliar em região de Savanna frente às mudanças climáticas. Dissertação (mestrado). **Universidade Federal do Mato Grosso**. 2019.

GUARDA. Emeli Lalesca Aparecida; DOMINGOS. Renata Mansuelo Alves; JORGE. Stefany Hoffmann Martins; DURANTE. Luciane Cleonice; SANCHES. João Carlos Machado; LEÃO. Marlon; CALLEJAS. Ivan Julio Apolonio. The influence of climate change on renewable energy systems designed to achieve zero energy buildings in the present: A case study in the Brazilian Savannah. **Sustainable Cities and Society**. v. 52. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101843>

GUPTA. Rajat; GREGG. Matthew. Assessing the Magnitude and Likely Causes of Summertime Overheating in Modern Flats in UK. **Energies**. v. 13. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13195202>

GUPTA. Rajat; GREGG. Matthew. Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. **Building and Environment**. v.55. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.014>

HAMDY. Mohamed; CARLUCCI. Salvatore; HOES. Pieter-Jan; HENSEN. Jan L. M. The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study. **Building and Environment**. v. 122. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>

HASAN, Shaheen et al. Study of natural insulation materials and compared it with no insulation building. **Mater. Today Proc.**, v. 46, 2021, p. 10692-10697. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.452.

HASS. Alisa L.; ELLIS. Kelsey N. Using wearable sensors to assess how a heatwave affects individual heat exposure. perceptions. and adaption methods. **International Journal of Biometeorology**. v. 63. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01770-6>

HATVANI-KOVACS. Gertrud; BELUSKO. Martin; SKINNER. Natalie; POCKETT. John; BOLAND. John. Heat stress risk and resilience in the urban environment. **Sustainable Cities and Society**. v. 26. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.019>

HAYLES. Carolyn S.; HUDDLESTON. Matt; CHINOWSKY. Paul; HELMAN. Jacob. Summertime impacts of climate change on dwellings in Wales. UK. **Building and Environment**. v. 219. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109185>

HONDULA. David M.; DAVIS. Robert E.; SAHA. Michael V.; WEGNER. Carleigh R.; VEAZEY. Lindsay M. Geographic dimensions of heat-related mortality in seven U.S. cities. **Environmental Research**. v. 138. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.033>

HOSSEINI. Mirata; BIGTASHI. Anahita; LEE. Bruno. Generating future weather files under climate change scenarios to support building energy simulation – A machine learning approach. **Energy and Buildings**. v. 230. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110543>

HOSSEINI. Mohammad; JAVANROODI. Kavan; NIK. Vahid. M. High-resolution impact assessment of climate change on building energy performance considering extreme weather events and microclimate – Investigating variations in indoor thermal comfort and degree-days. **Sustainable Cities and Society**. v. 78. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103634>

IEA – Internacional Energy Agency. **Perspectives for the clean energy transition**. The critical role of buildings. 2019. Disponível em: <http://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings>. Acesso em: 28 abr. 2023.

IEA – Internacional Energy Agency. **World Energy Outlook 2022 Sumário executivo**. 2022. Disponível em: www.iea.org/weo. Acesso em: 28 abr. 2023.

INVIDIATA. Andrea; GHISI. Eneidir. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**. v. 130. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press and New York. 2021. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf. Acesso em: 03 mai. 2023

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press and New York. 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em: 03 mai. 2023

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. **Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press and New York. 2022. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf. Acesso em: 03 mai. 2023

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press and New York. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf. Acesso em: 03 mai. 2023

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming of 1.5 °C**. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 03 mai. 2023

ITANI, M., GHADDAR, N., GHALI, K., LAOUADI, A. Development of heat stress charts for older people under indoor environmental conditions. *Energy and Buildings*, 224, 110274. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110274>

JENTSCH. Mark F.; BAHAJ. AbuBakr S.; JAMES. Patrick. A. B. Climate change future proofing of buildings - Generation and assessment of building simulation weather files. **Energy and Buildings**. v. 40. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>

JENTSCH. Mark F.; JAMES. Patrick A. B.; BOURIKAS. Leonidas; BAHAJ. AbuBakr S. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**. v. 55. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>

JI, L., LAOUADI, A., SHU, C., WANG, L., LACASSE, M. A. Evaluation and improvement of the thermoregulatory system for the two-node bioheat model. *Energy and Buildings*, 249, 111235. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111235>

JI, L., SHU, C., LAOUADI, A., LACASSE, M., WANG, L. Quantifying improvement of building and zone level thermal resilience by cooling retrofits against summertime heat events. *Building and Environment*, 229, 109914. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109914>

JI, W., ZHU, Y., CAO, B. Development of the Predicted Thermal Sensation (PTS) model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database. *Energy and Buildings*, 211, 109780. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.109780>

JI. Lili; LAOUADI. Abdelaziz; SHU. Chang; GAUR. Abhishek; LACASSE. Michael; WANG. Liangzhu. Evaluating approaches of selecting extreme hot years for assessing building overheating conditions during heatwaves. **Energy and Buildings**. v. 254. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111610>

JIANG. Aiyin; LIU. Xudong; CZARNECKI. Emily; ZHANG. Chengyi. Hourly weather data projection due to climate change for impact assessment on building and infrastructure. **Sustainable Cities and Society**. v. 50. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101688>

JYOTEESHKUMAR. Reddy P.; PERKINS-KIRKPATRICK. Sarah E.; SHARPLES. Jason J. Intensifying Australian Heatwave Trends and Their Sensitivity to Observational Data. **Earth's Future**. v. 9. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020EF001924>

KIM, J. T., LIM, J. H., CHO, S. H., YUN, G. Y. Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances. *Energy and Buildings*, 98, 100–105. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.08.051>

KIM, J., TARTARINI, F., PARKINSON, T., COOPER, P., & DE DEAR, R. (2019). Thermal comfort in a mixed-mode building: Are occupants more adaptive? *Energy and Buildings*, 203, 109436. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109436>

KIM. Jungsoo; TARTARINI. Federico; PARKINSON. Thomas; COOPER. Paul; DE DEAR. Richard. Thermal comfort in a mixed-mode building: Are occupants more adaptive? **Energy and Buildings**. v. 203. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109436>

KIM. Young-Min; KIM. Soyeon; CHEONG. Hae-Kwan; AHN. Byngok; CHOI. Kyusik. Effects of heat wave on body temperature and blood pressure in the poor and elderly. **Environ Health Toxicol**. v. 27. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5620/eh.2012.27.e2012013>

- KOTESWARA RAO, K., LAKSHMI KUMAR, T. V., KULKARNI, A., HO, C. H., MAHENDRANATH, B., DESAMSETTI, S., PATWARDHAN, S., DANDI, A. R., BARBOSA, H.; SABADE, S. Projections of heat stress and associated work performance over India in response to global warming. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–14. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73245-3>
- KRANC. Hannan; NOVACK. Victor; SHTEIN. Alexandra; SHERMAN. Rimma; NOVACK. Lena. Extreme temperature and out-of-hospital-cardiac-arrest. Nationwide study in a hot climate country. **Environ Health**. v. 5. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00722-1>
- KWOK, Y. T., SCHOETTER, R., NG, E. Towards decarbonisation targets by changing setpoint temperature to avoid building overcooling and implementing district cooling in (sub)tropical high-density cities – A case study of Hong Kong. *Science of the Total Environment*, 811, 152338. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152338>
- KWOK. Yu Ting; SCHOETTER. Robert; NG. Edward. Towards decarbonisation targets by changing setpoint temperature to avoid building overcooling and implementing district cooling in (sub)tropical high-density cities – A case study of Hong Kong. **Science of The Total Environment**. v. 811. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152338>
- LAOUADI, A., BARTKO, M., LACASSE, M. A. A new methodology of evaluation of overheating in buildings. *Energy and Buildings*, 226, 110360. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110360>
- LAOUADI. Abdelaziz; JI. Lili; SHU. Chang; WANG. Liangzhu; LACASSE. Michael A. Overheating Risk Analysis in Long-Term Care Homes—Development of Overheating Limit Criteria. **Buildings**. v. 13. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13020390>
- LIU, S., KWOK, Y. T., LAU, K. K. L., TONG, H. W., CHAN, P. W., NG, E. Development and application of future design weather data for evaluating the building thermal-energy performance in subtropical Hong Kong. *Energy and Buildings*, 209, 109696. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109696>
- LIU. Weiwei; ZHONG. Weidi; WARGOCKI. Pawel. Performance. acute health symptoms and physiological responses during exposure to high air temperature and carbon dioxide concentration. **Building and Environment**. v. 144. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.020>
- LOMAS. Kelvin J.; PORRITT. Stephen M. Overheating in buildings: lessons from research. **Building Research & Information**. v. 45. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1256136>
- MAC. Valerie Vi Thien; McCAULEY. Linda A. Farmworker Vulnerability to Heat Hazards: A Conceptual Framework. **Journal of Nursing Scholarship**. v. 49. 2017. DOI: <https://doi.org/doi/10.1111/jnu.12327>
- MANYUCHI. Albert Edgar; VOGEL. Coleen; WRIGHT. Caradee Y.; ERASMUS. Barend. The self-reported human health effects associated with heat exposure in Agincourt sub-district of South Africa. **Humanities and Social Sciences Communications**. v. 9. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01063-1>
- MANZANO-AGUGLIARO, F., MONTOYA, F. G., SABIO-ORTEGA, A., GARCÍA-CRUZ, A. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 49, pp. 736–755). Pergamon. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- MARRA. Natália Carolina Sousa Nascentes. Avaliação do conforto térmico em conjunto habitacional de interesse social – Simulação computacional com o programa Solene Microclima. Dissertação (mestrado). **Universidade Federal de Minas Gerais**. 2017.

MARTÍN. Yago; PANEQUE. Pilar. Moving from adaptation capacities to implementing adaptation to extreme heat events in urban areas of the European Union: Introducing the U-ADAPT! research approach. **Journal of Environmental Management**. v. 310. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114773>

MAZZAFERRO, L., SORGATO, M. J., VERSAGE, R., MELO, A. P., & LAMBERTS, R. (2013). Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do pré-processador SLAB no programa EnergyPlus. <http://www.labeee.ufsc.br/telefones>

MEHMOOD, S., LIZANA, J., NÚÑEZ-PEIRÓ, M., MAXIMOV, S. A., FRIEDRICH, D. Resilient cooling pathway for extremely hot climates in southern Asia. *Applied Energy*, 325, 119811. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119811>

MEINKE, A., HAWIGHORST, M., WAGNER, A., TROJAN, J., SCHWEIKER, M. Comfort-related feedforward information: occupants' choice of cooling strategy and perceived comfort. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1233774>, 45(1–2), 222–238. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1233774>

MOAZAMI. Amin; CARLUCCI. Salvatore; GEVING. Stig. Critical Analysis of Software Tools Aimed at Generating Future Weather Files with a view to their use in Building Performance Simulation. **Energy Procedia**. v. 132. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.701>

MORA. Camilo; DOUSSET. Bénédicte; CALDWELL. Ianin R.; POWELL. Farrah E.; GERONIMO. Rollan C.; BIELECKI. Coral R.; COUNSELL. Chelsie W. W.; DIETRICH. Bonnie S.; JOHNSTON. Emily T.; LOUIS. Leo V.; LUCAS. Matthew P.; MCKENZIE. Marie M.; SHEA. Alessandra G.; TSENG. Han; GIAMBELLUCA. Thomas W.; LEON. Lisa R.; HAWKINS. Ed.; TRAUERNICHT. Clay. Global risk of deadly heat. **Nature Climate Change**. v. 7. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3322>

MOREY. Johanna; BEIZAE. Arash; WRIGHT. Andrew. An investigation into overheating in social housing dwellings in central England. **Building and Environment**. v. 176. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106814>

MOSTAFAZADEH, F., EIRDMOUSA, S. J., TAVAKOLAN, M. Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach. *Energy and Buildings*, 280, 112721. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112721>

NETO. Alberto Hernandez; DURANTE. Luciane Cleonice; CALLEJAS. Ivan Julio Apolonio; GUARDA. Emeli Lalesca Aparecida; MOREIRA. José Vinncius Ranieri. The challenges on operating a zero net energy building facing global warming conditions. **Building Simulation**. v. 15. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0809-4>

NICOL. Fergus; HUMPHREYS. Michael. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**. v. 34. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)

NICOL. Fergus; HUMPHREYS. Michael. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. **Building and Environment**. v. 45. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.013>

NICOL. Fergus; HUMPHREYS. Michael. Thermal comfort as part of a self-regulating system. **Building Research and Practice**. v. 1. 1973. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613217308550237>

NICOL. Fergus; HUMPHREYS. Michael; ROAF. Susan. Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice. **Book Routledge**. Edition 1. 2012. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203123010>

- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. National Centers for Environmental Information. **Monthly Global Climate Report for Annual 2021**. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202013/supplemental/page-3>. Acesso em: 03 mai. 2023
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. **The Heat Index Equation. 2022**. Disponível em: https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml. Acesso em: 03 mai. 2023
- ONU – Organização das Nações Unidas. (2002). Living with Risk Living with Risk A global review of disaster reduction initiatives A global review of disaster reduction initiatives Preliminary version. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2019/aug/29/the-air-conditioning-trap-how-cold-air-is-heating-the-world>. Acesso em: 28 abr. 2023.
- OZARISOY, B. Energy effectiveness of passive cooling design strategies to reduce the impact of long-term heatwaves on occupants' thermal comfort in Europe: Climate change and mitigation. **Journal of Cleaner Production**. v. 330. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129675>
- PAJEK, L., POTOČNIK, J., KOŠIR, M. The effect of a warming climate on the relevance of passive design measures for heating and cooling of European single-family detached buildings. *Energy and Buildings*, 261, 111947. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.111947>
- PAJEK, Luka; KOSIR, Mitja. Exploring Climate-Change Impacts on Energy Efficiency and Overheating Vulnerability of Bioclimatic Residential Buildings under Central European Climate. **Sustainability**. v. 13. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126791>
- PARSONS, K. C. Heat stress standard ISO 7243 and its global application. **Ind Health**. v. 44. 2006. DOI: <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.368>
- PARSONS, K. C. Human Thermal Environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. 2014. Taylor & Francis.
- PATHAN, A.; MAVROGIANNI, A.; SUMMERFIELD, A.; ORESZCZYN, T.; DAVIES, M. Monitoring summer indoor overheating in the London housing stock. **Energy and Buildings**. v. 141. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.049>
- PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., & MCMAHON, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/HESS-11-1633-2007>
- RAHIF, R., HAMDY, M., HOMAELI, S., ZHANG, C., HOLZER, P., ATTIA, S. Simulation-based framework to evaluate resistivity of cooling strategies in buildings against overheating impact of climate change. *Building and Environment*, 208, 108599. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108599>
- RAHIF, R., KAZEMI, M., ATTIA, S. Overheating analysis of optimized nearly Zero-Energy dwelling during current and future heatwaves coincided with cooling system outage. *Energy and Buildings*, 287, 112998. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.112998>
- RAJA, Debasish Roy; HREDOY, Shah Naim; ISLAM, Kamrul; ISLAM, Ashraful; ADNAN, Mohammed Sarfaraz Gani. Spatial distribution of heatwave vulnerability in a coastal city of Bangladesh. **Environmental Challenges**. v. 4. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100122>
- RANA, Irfan Ahmad; SIKANDER, Laila; KHALID, Zainab; NAWAZ, Adnan; NAJAM, Fawad Ahmed; KHAN, Sibghat Ullah; ASLAM, Ayman. A localized index-based approach to assess heatwave vulnerability and climate change adaptation strategies: A case study of formal and informal settlements of

- Lahore, Pakistan. **Environmental Impact Assessment Review**. v. 96. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106820>
- ROAF, Sue; CRICHTON, David; NICOL, Fergus. Adapting Buildings and Cities for Climate Change. **Book: A 21st Century Survival Guide**. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9781856177207/adapting-buildings-and-cities-for-climate-change#book-info>. Acesso em: 11 mai. 2023
- RODRIGUES, Eugénio; FERNANDES, Marcos S.; CARVALHO, David. Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. **Building and Environment**. v. 233. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110104>
- ROSHAN, GholamReza; OJI, Ruhollah; ATTIA, Shady. Projecting the impact of climate change on design recommendations for residential buildings in Iran. **Building and Environment**. v. 155. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.053>
- ROTHMAN, Dale S.; ROMERO-LANKAO, Patricia; SCHWEIZER, Vanessa J.; BEE, Beth A. Challenges to adaptation: a fundamental concept for the shared socio-economic pathways and beyond. **Climatic Change**. v. 122. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0907-0>
- SHELLER, Camila; MELO, Ana Paula; SORGATO, Marcio Jose; LAMBERTS, Roberto. Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. 2015. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4460.3127>
- SCHWEIKER, M., WAGNER, A. A framework for an adaptive thermal heat balance model (ATHB). *Building and Environment*, 94(P1), 252–262. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.08.018>
- SCHWEIZER, Vanessa J.; O' NEILL, Brian C. Systematic construction of global socioeconomic pathways using internally consistent element combinations. **Climatic Change**. v. 122. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0908-z>
- SHAIK, S., ROY, A., ARICI, M., KONTOLEON, K. J., AFZAL, A., LI, D. Air-conditioning cost savings, CO2 emission benefits and return on investment by using waste in porotherm bricks in hot-arid and warm-temperate climates. *Energy and Buildings*, 286, 112955. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.112955>
- SHEN, P. Impacts of climate change on U.S. building energy use by using downscaled hourly future weather data. *Energy and Buildings*, 134, 61–70. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.09.028>
- SIMÕES, Gianna Monteiro Farias; LEDER, Solange Maria. Energy poverty: The paradox between low income and increasing household energy consumption in Brazil. **Energy and Buildings**. v. 268. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112234>
- SKILLINGTON, Katie; CRAWFORD, Robert. H.; WARREN-MYERS, Gerogia; DAVIDSON, Kathryn. A review of existing policy for reducing embodied energy and greenhouse gas emissions of buildings. **Energy Policy**. v. 168. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112920>
- SUN, Kaiyu; SPECIAN, Michael; HONG, Tianzhen. Nexus of thermal resilience and energy efficiency in buildings: A case study of a nursing home. **Building and Environment**. v. 177. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106842>
- SZAGRI, Dóra; SZALAY, Zsuzsa. Theoretical fragility curves – A novel approach to assess heat vulnerability of residential buildings. **Sustainable Cities and Society**. v. 83. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103969>

- TARIQ. Aqil; MUMTAZ. Faisal; ZENG. Xing; BALOCH. Muhammad Yousuf Jat; MOAZZAM. Muhammad Farhan Ui. Spatio-temporal variation of seasonal heat islands mapping of Pakistan during 2000–2019. using day-time and night-time land surface temperatures MODIS and meteorological stations data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. v. 27. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100779>
- TARTARINI, F., SCHIAVON, S., CHEUNG, T., HOYT, T. CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. *SoftwareX*, 12, 100563. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SOFTX.2020.100563>
- TAVAKOLI, E., O'DONOVAN, A., KOLOKOTRONI, M., O'SULLIVAN, P. D. Evaluating the indoor thermal resilience of ventilative cooling in non-residential low energy buildings: A review. *Building and Environment*, 222, 109376. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109376>
- TAYLOR. Jonathon; McLEOD. Robert; PETROU. Giorgos; HPFE. Christina; MAVROGIANNI. Anna; CASTAÑO-ROSA. Raúl; PELSMAKERS. Sofie; LOMAS. Kevin. Ten questions concerning residential overheating in Central and Northern Europe. **Building and Environment**. v. 234. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110154>
- TOOTKABONI, P. M.; BALLARINI, I.; ZINZI, M.; CORRADO, V. A Comparative Analysis of Different Future Weather Data for Building Energy Performance Simulation. *Climate*, 9(2), 37, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli9020037>.
- TRIANA, M. A., LAMBERTS, R., SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. *Energy and Buildings*, 158, 1379–1392. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.003>
- TRIANA. María Andrea. Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas. Tese (Doutorado). **Universidade Federal de Santa Catarina**. 2016.
- TRIANA. Maria Andrea; LAMBERTS. Roberto; SASSI. Paola. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**. v. 158. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.003>
- TRZASKA. Sylwia; SCHNARR. Emilie. A review of downscaling methods for climate change projections. **American people through the U.S. Agency for International Development (USAID)**. 2014. Disponível em: https://www.climatelinks.org/sites/default/files/asset/document/Downscaling_CLEARED.pdf. Acesso em: 02 mai. 2023.
- UNEP - United Nations Environment Programme. 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions. Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector - **Executive Summary**. 2020. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34572>. Acesso em: 03 mai. 2023
- VURRO. Giandomenico; SANTAMARIA. Valentina; CHIARANTONI. Carla; FIORITO. Francesco. Climate Change Impact on Energy Poverty and Energy Efficiency in the Public Housing Building Stock of Bari. Italy. **Climate**. v. 10. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli10040055>
- WAN, K. K. W., LI, D. H. W., LIU, D., LAM, J. C. Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates. *Building and Environment*, 46(1), 223–234. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.016>
- WANG, H., CHEN, Q. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy and Buildings*, 82, 428–436. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.07.034>

- WANG, J., CHEN, Y., TETT, S. F. B., YAN, Z., ZHAI, P., FENG, J., & XIA, J. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1–11. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14233-8>
- WANG, L., LIU, X., BROWN, H. Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. *Energy and Buildings*, 157, 218–226. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.007>
- WANG. Ran; LU. Shilei; ZHAI. Xue; FENG. Wei. The energy performance and passive survivability of high thermal insulation buildings in future climate scenarios. **Building Simulation**. v. 15. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0818-3>
- WANG. Shangyu; LIU. Yan; CAO Qimeng; LI. Honglian; YU. Ying; YANG. Liu. Applicability of passive design strategies in China promoted under global warming in past half century. **Building and Environment**. v. 195. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107777>
- WHITE-NEWSOME. Jalonne L.; SÁNCHEZ. Brisa N.; JOLLIET. Olivier; ZHANG. Zhenzhen; PARKER. Edith A.; DVONCH. Timothy; O'NEILL. Marie S. Climate change and health: Indoor heat exposure in vulnerable populations. **Environmental Research**. v. 122. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.10.008>
- WMO – World Meteorological Organization. 2021 one of the seven warmest years on record. **WMO consolidated data shows**. 2022. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2021-one-of-seven-warmest-years-record-wmo-consolidated-data-shows>. Acesso em: 03 mai 2023
- WMO – World Meteorological Organization. **June ends with exceptional heat**. 2021. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/news/june-ends-exceptional-heat>. Acesso em: 03 mai 2023
- WMO – World Meteorological Organization. **WMO confirms 2019 as second hottest year on record**. 2020. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-confirms-2019-second-hottest-year-record>. Acesso em: 28 abr. 2023.
- WOLLSCHLAEGER, S., SADHU, A., EBRAHIMI, G., & WOO, A. Investigação dos impactos das mudanças climáticas nos ocupantes de instituições de longa permanência. *City and Environment Interactions*, 13, 100077. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CACINT.2021.100077>
- XU, P., HUANG, Y. J., MILLER, N., SCHLEGEL, N., SHEN, P. Impacts of climate change on building heating and cooling energy patterns in California. *Energy*, 44 (1), 792–804. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.05.013>
- XU. Zhiwei; FITZGERALD. Gerard; GUO. Yuming; JALALUDIN. Bin; TONG. Shilu. Assessing heatwave impacts on cause-specific emergency department visits in urban and rural communities of Queensland. Australia. **Environmental Research**. v. 168. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.013>
- YE, G., YANG, C., CHEN, Y., LI, Y. A new approach for measuring predicted mean vote (PMV) and standard effective temperature (SET*). *Building and Environment*, 38(1), 33–44. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00027-6)
- Yildiz, Y. (2015). Energy performance of Windows under climate change in Turkey. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 168(3), 120–130. <https://doi.org/10.1680/ensu.14.00045>
- ZAKI. Sheikh Ahmad; ROSLI. Mohamad Faizal; RIJAL. Hom Bahadur; SADZLI. Farah Nurhanis Hassan; HAGISHIMA. Aya; YAKUB. Fitri. Effectiveness of a Cool Bed Linen for Thermal Comfort and

Sleep Quality in Air-Conditioned Bedroom under Hot-Humid Climate. **Sustainability**. v. 13. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169099>

ZENG, Zhaoyun; ZHANG. Wann; SUN. Kaiyu; WEI. Max; HONG. Tianzhen. Investigation of pre-cooling as a recommended measure to improve residential buildings' thermal resilience during heat waves. **Building and Environment**. v. 210. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108694>

ZHANG, C., KAZANCI, O. B., LEVINSON, R., HEISELBERG, P., OLESEN, B. W., CHIESA, G., SODAGAR, B., AI, Z., SELKOWITZ, S., ZINZI, M., MAHDAVI, A., TEUFL, H., KOLOKOTRONI, M., SALVATI, A., BOZONNET, E., CHTIOUI, F., SALAGNAC, P., RAHIF, R., ATTIA, S., ZHANG, G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. *Energy and Buildings*, 251, 111312.2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111312>

ZHANG, S., LIN, Z. Standard effective temperature based adaptive-rational thermal comfort model. *Applied Energy*, 264, 114723. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114723>

ZHU, M., PAN, Y., HUANG, Z., XU, P. An alternative method to predict future weather data for building energy demand simulation under global climate change. *Energy and Buildings*, 113, 74–86. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.12.020>

ZOU, Jiwei; GAUR, Abhishek; WANG, Liangzhu; LAOUADI. Abdelaziz; LACASSE. Michael. Assessment of future overheating conditions in Canadian cities using a reference year selection method. **Building and Environment**. v. 218. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109102>

ZOU, Yukai; XIANG, Ke; ZHAN. Qiaosheng; LI. Zhixing. A simulation-based method to predict the life cycle energy performance of residential buildings in different climate zones of China. **Building and Environment**. v. 193. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107663>

ZUNE. May; RODRIGUES. Lucelia; GILLOTT. Mark. The vulnerability of homes to overheating in Myanmar today and in the future: A heat index analysis of measured and simulated data. **Energy and Buildings**. v. 223. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110201>

APÊNDICE A – Estudos pilotos para o aprimoramento da metodologia da pesquisa

Este apêndice apresenta alguns recortes do desenvolvimento do procedimento metodológico realizado no capítulo 3 desta pesquisa, a saber: a caracterização climática das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis e o enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico conforme a NBR 15.575.

A.1 Procedimento metodológico – estudo piloto

A.1.1 Caracterização climática das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis:

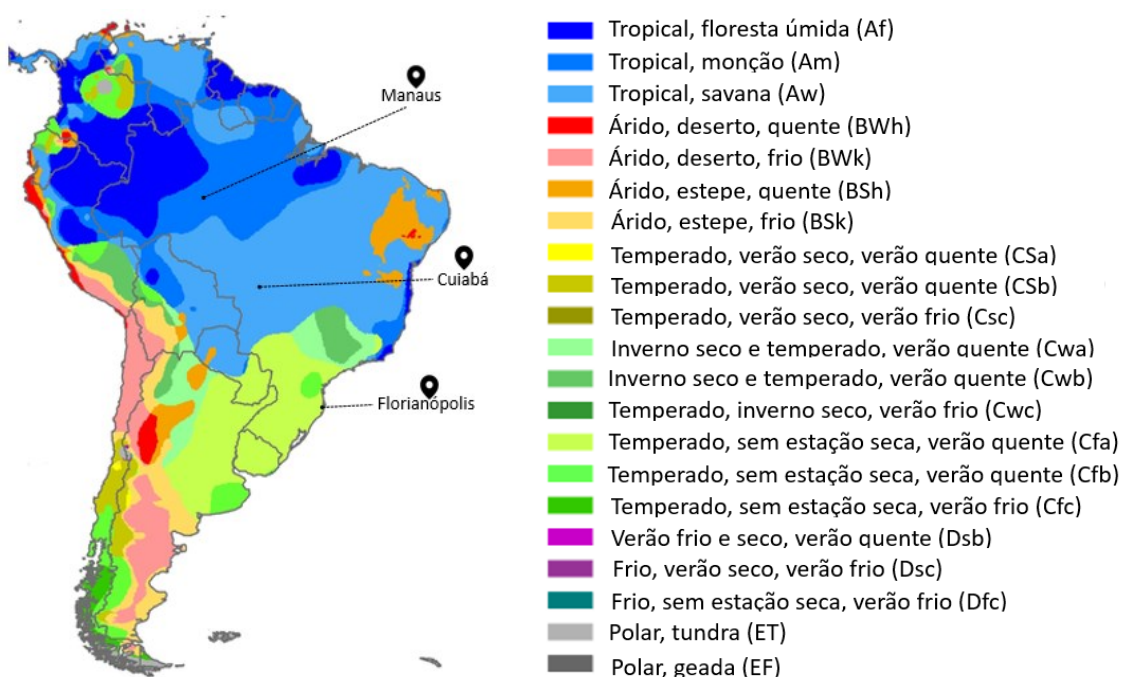
Utilizando como base a classificação de Köppen-Geiger (Peel, Finlayson e McMahon, 2007), o tipo climático “Am” é caracterizado como um clima de Monção, apresentando uma temperatura média anual em torno de 27,0°C, elevada umidade relativa e um índice pluviométrico anual alto, em torno de 2.300mm. Por sua vez, o tipo climático “Aw” é classificado como clima de Savana, com meses mais secos e uma precipitação média inferior a 60mm. Já o clima “Cfa” é caracterizado como um clima oceânico temperado e subtropical úmido, com temperaturas médias abaixo de 22,0°C e acima de 10,0°C (Figura 52-a).

A classificação da ASHRAE 169 (2020) inclui um conjunto de 0 a 8 zonas climáticas, definidas com base nos índices Graus-dia de Resfriamento (CDD) e Graus-dia de Aquecimento (HDD). Climas com predominância de resfriamento ao longo do ano são caracterizados por baixo HDD (≤ 2000), enquanto aquelas com $HDD \geq 2000$ podem ser caracterizados por resfriamento e/ou aquecimento. Portanto, essa classificação destaca a predominância da demanda de resfriamento e/ou aquecimento nos edifícios de acordo com as características climáticas.

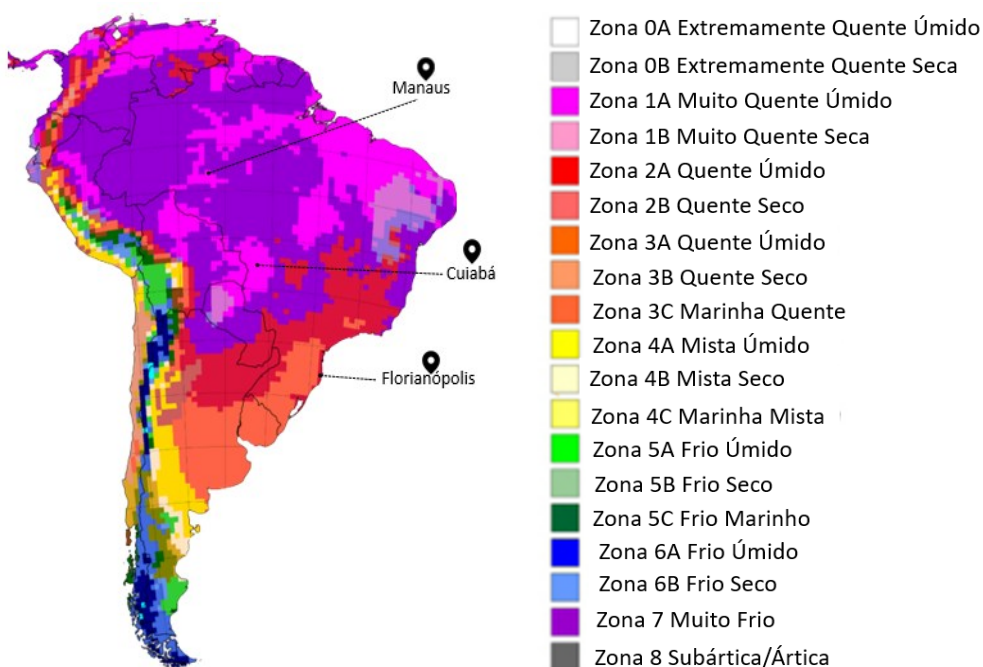
Assim, as cidades de Manaus e Cuiabá estão localizadas no tipo climático “0A”, sendo caracterizado como “Extremamente quente e úmido” com intervalo de $6000 < CDD_{10^{\circ}C}$. Por outro lado, Florianópolis está localizada no tipo climático “2A”, sendo caracterizada como “Quente úmido” com intervalo de $3500 < CDD_{10^{\circ}C} < 5000$. Isso significa que as cidades apresentam predominância de demanda para resfriamento (Figura 52-b).

Figura 53 - Mapa Climático com a identificação das regiões de estudo

a) Köppen-Geiger



b) ASHRAE Standard 169

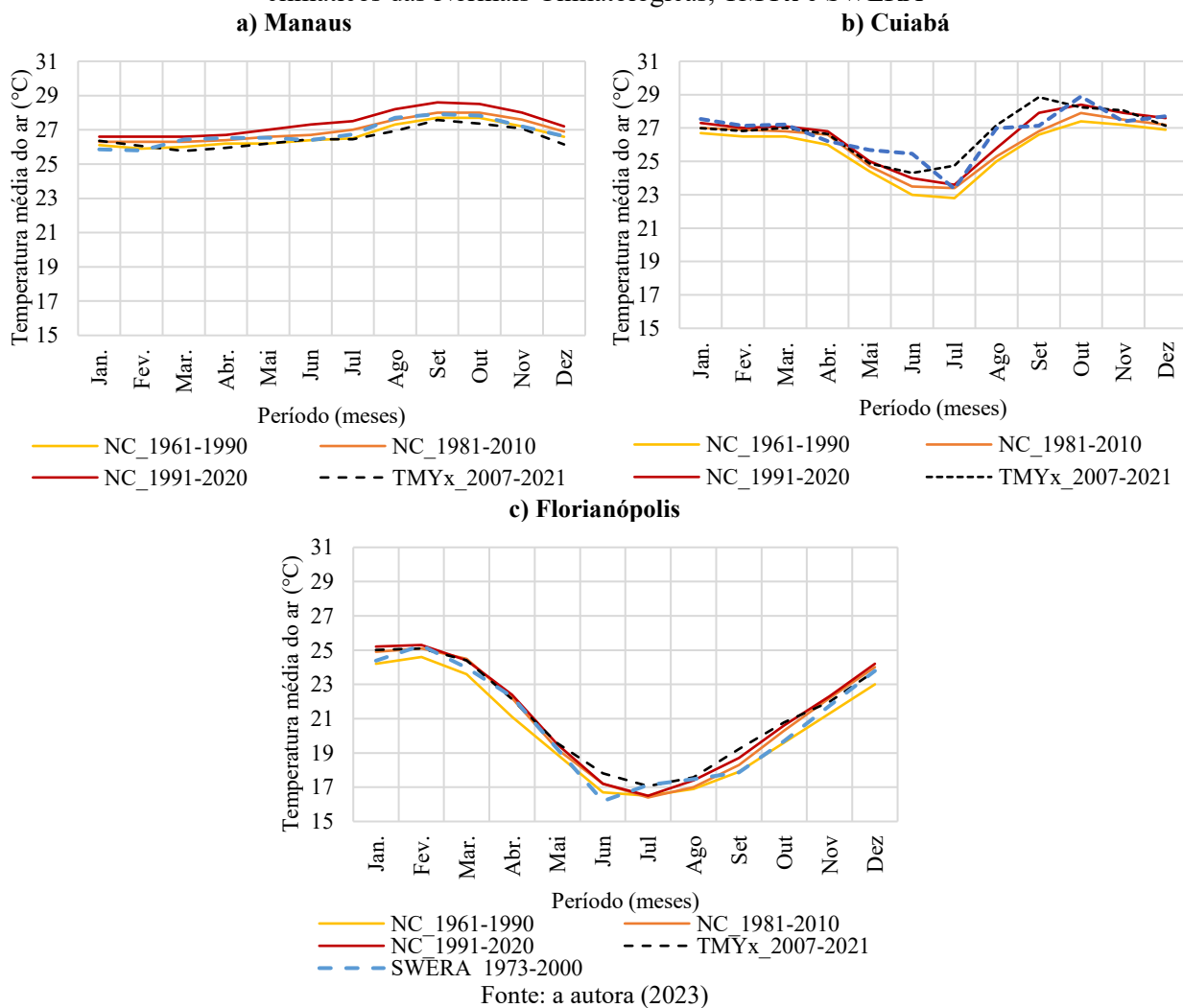


Fonte: adaptado de Peel, Finlayson e McMahon (2007) e ASHRAE Standard 169 (2020)

Para fins de análise para compreender o perfil e a evolução climática de cada região de estudo, foram investigadas as três Normais Climatológicas (NC) disponíveis para os períodos de 1931-1960, 1961-1990 e 1981-2010 fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET),

com base em dados coletados por estações meteorológicas. De acordo com a definição da Organização Meteorológica Mundial (OMM), as normais climatológicas são “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” (WMO, 1998). Além disso, foram incluídos nas análises os chamados anos "sintéticos", os quais foram construídos a partir de um banco de dados, sendo esses o TMYx e o SWERA (Figura 53).

Figura 54 - Variação das temperaturas médias anuais nas três cidades de estudo considerando os arquivos climáticos das Normais Climatológicas, TMYx e SWERA



A.1.2 Enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico conforme a NBR 15.575

No Brasil, existem duas normativas que apresentam diretrizes construtivas, estratégias passivas e a avaliação de desempenho térmico para edificações residenciais, levando em

consideração o clima da região em que estão localizadas: a NBR 15.220 (ABNT, 2003) e a NBR 15.575 (ABNT, 2021).

A NBR 15.220 (ABNT, 2003) orienta os projetistas a utilizarem estratégias bioclimáticas para adequar as edificações ao clima em que estão inseridas. As diretrizes construtivas foram elaboradas com base na carta bioclimática de Givoni, dividindo o país em oito Zonas Bioclimáticas (ZB), que representam regiões com características climáticas semelhantes. Isso permite otimizar as recomendações construtivas para atender às necessidades de cada zona e garantir a adequação das edificações ao clima. Neste estudo, as regiões analisadas pertencem a três zonas: ZB3 (Florianópolis), ZB7 (Cuiabá) e ZB8 (Manaus).

Considerando a ZB3, no verão, as estratégias recomendadas são a ventilação cruzada, enquanto no inverno são utilizados o aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica). Na ZB7, as estratégias adotadas no verão são o resfriamento evaporativo e o uso de massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva, quando a temperatura interna é superior à externa. Por fim, na ZB8, há indicação de estratégia bioclimática apenas para o verão, com a adoção de ventilação cruzada permanente.

A NBR 15.575 (ABNT, 2021) trata do desempenho térmico de edificações residenciais, considerando a envoltória, as áreas envidraçadas e as aberturas para ventilação, além das cargas térmicas internas, como pessoas, iluminação e equipamentos. Também leva em conta a operação das aberturas e do clima da região de estudo, considerando as ZB definidas pela NBR 15.220 (ABNT, 2003). Além disso, estabelece requisitos mínimos, critérios e métodos para a avaliação do desempenho térmico das habitações, por meio de dois procedimentos metodológicos: o simplificado e o de simulação computacional.

O procedimento simplificado avalia o desempenho térmico da Unidade Habitacional (UH) por meio de comparações das características geométricas das Áreas de Permanência Prolongada (APP) e das propriedades termofísicas dos sistemas construtivos em relação aos valores de referência para Vedações Verticais Externas (SVVE) e de coberturas, descritos na parte quatro e cinco da normativa (ABNT, 2021), respectivamente.

No caso de algum dos critérios do procedimento simplificado não ser atendido em uma ou mais APP, o desempenho é avaliado por meio de simulação computacional. No caso de edificações multifamiliares, o mesmo procedimento deve ser adotado para todas as UH. O procedimento simplificado permite a análise de desempenho térmico para alcançar o nível mínimo, que é de

caráter obrigatório. Já o atendimento aos níveis intermediário e superior deve ser avaliado por meio do procedimento de simulação computacional (ABNT, 2021).

Assim, por meio desse método, devem ser elaborados dois modelos: o modelo real, que conserva as características originais da edificação, e o modelo de referência, no qual devem ser realizadas modificações de acordo com os valores de referência indicados na NBR 15.575 (ABNT, 2021). Dessa maneira, esse método é dividido em duas simulações: uma com ventilação natural e outra sem ventilação natural. Para avaliar o atendimento ao desempenho mínimo, os modelos real e de referência devem ser simulados considerando apenas o uso da ventilação natural. Já para avaliar o atendimento do desempenho intermediário e superior, devem ser realizadas simulações com e sem o uso de ventilação natural.

Na simulação com atendimento ao desempenho mínimo, deve-se determinar o Percentual de Horas de Ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT) e identificar as Temperaturas Operativas Anuais Máximas (Tomáx) e mínimas (Tomín) durante a ocupação, que variam de acordo com o clima. Na simulação com o atendimento de desempenho intermediário e superior, deve-se determinar a Carga Térmica Total (CgTT) para resfriamento e aquecimento, quando necessário. Posteriormente, realiza-se uma comparação entre a edificação real e a de referência para determinar o nível de desempenho térmico.

Conforme estabelecido na NBR 15.575 (ABNT, 2021), a avaliação de desempenho térmico é realizada para os APP presentes na UH. Considerando a HISbase, esses ambientes são: dormitório 1, dormitório 2, sala e cozinha (ambiente conjugado). Além disso, no caso de uma edificação multifamiliar, é necessário considerar o pavimento térreo, os pavimentos intermediários (tipo) e o pavimento de cobertura. É importante ressaltar que todas as unidades habitacionais de cada pavimento devem ser levadas em conta durante a avaliação.

Dessa maneira, o enquadramento da HISbase no nível mínimo de desempenho térmico foi realizado pelo procedimento simplificado da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

A adequação das janelas consistiu em atender aos critérios do Percentual de Abertura para Ventilação (Pv,APP) de acordo com as ZB, bem como o Percentual de Elementos Transparentes (Pt,APP), para as esquadrias da HISbase. Essas esquadrias são compostas por duas folhas de correr, sendo uma fixa e uma móvel, em todos os APP. Foi considerada uma espessura de 2,0cm (0,02m) para os caixilhos e as dimensões das aberturas, assim como os fatores de ventilação e iluminação, estão descritos na Tabela 19.

Para as ZB3 e ZB7, o valor mínimo estabelecido de PV, APP é de $\geq 7,0\%$ da área de piso, enquanto para a ZB 8 (Região Norte do Brasil) o valor mínimo é de $Pv, APP \geq 12,0\%$ da área de piso (ABNT, 2021). O cálculo do PV, APP, é realizado considerando a área efetiva de abertura para ventilação do APP (Av, APP em m^2) e a área de piso do APP (Ap, APP em m^2), conforme a Equação 14. O Percentual de Elementos Transparentes (Pt, APP) deve ser $\leq 20\%$, independentemente da ZB, e pode ser obtido pela área de superfície dos elementos transparentes (At, APP em m^2) dividida por Ap, APP , conforme a Equação 15.

$$Pv, APP = 100 \times \frac{(Av, APP)}{(Ap, APP)} \quad \text{Equação 14}$$

$$Pt, APP = 100 \times \frac{(At, APP)}{(Ap, APP)} \quad \text{Equação 15}$$

Com as esquadrias devidamente ajustadas, a HISbase foi simulada para fins de comparação com o modelo de referência em relação aos parâmetros de $PHFT_{UH}$, $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$, a fim de atender ao nível de desempenho mínimo. O método de simulação e os parâmetros de entrada, como modelagem, definição dos padrões de ocupação e cargas internas dos APP, bem como a definição da temperatura do solo, estão detalhadamente descritos no item 3.3.4. O arquivo climático utilizado para essa simulação foi o SWERA, para as cidades de Florianópolis, Cuiabá e Manaus, foco desta pesquisa.

De acordo com a NBR15.575 (ABNT, 2021), o modelo de referência deve representar fielmente a edificação em análise, adotando as características de referência. Isso inclui paredes externas e internas, cobertura, piso, considerando aspectos como espessura (Esp. em cm), condutividade térmica (γ em $W/(m.K)$), calor específico (c em $J/(kg.K)$), absorvância à radiação solar (α), emissividade de onda longa (ϵ) e densidade (ρ kg/m^3), conforme especificados na Tabela 24. Além disso, é necessário considerar uma câmara de ar com resistência térmica de $0,21 m^2.K/W$. Para a ZB8, é recomendado o uso de isolamento térmico com resistência térmica igual a $0,67 m^2.K/W$ sobre a laje.

Tabela 37 – Propriedades térmicas das paredes, cobertura e piso para o modelo de referência

Envoltória	Esp. (cm)	γ W/(m.K)	c J/(kg.K)	α	ε	ρ kg/m ³
Paredes externas		1,75	1000	0,58	0,90	2200
Paredes internas	10,0	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Pisos	-	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Telha	0,060	0,65	840	0,65	0,90	1700
Laje	10,0	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200

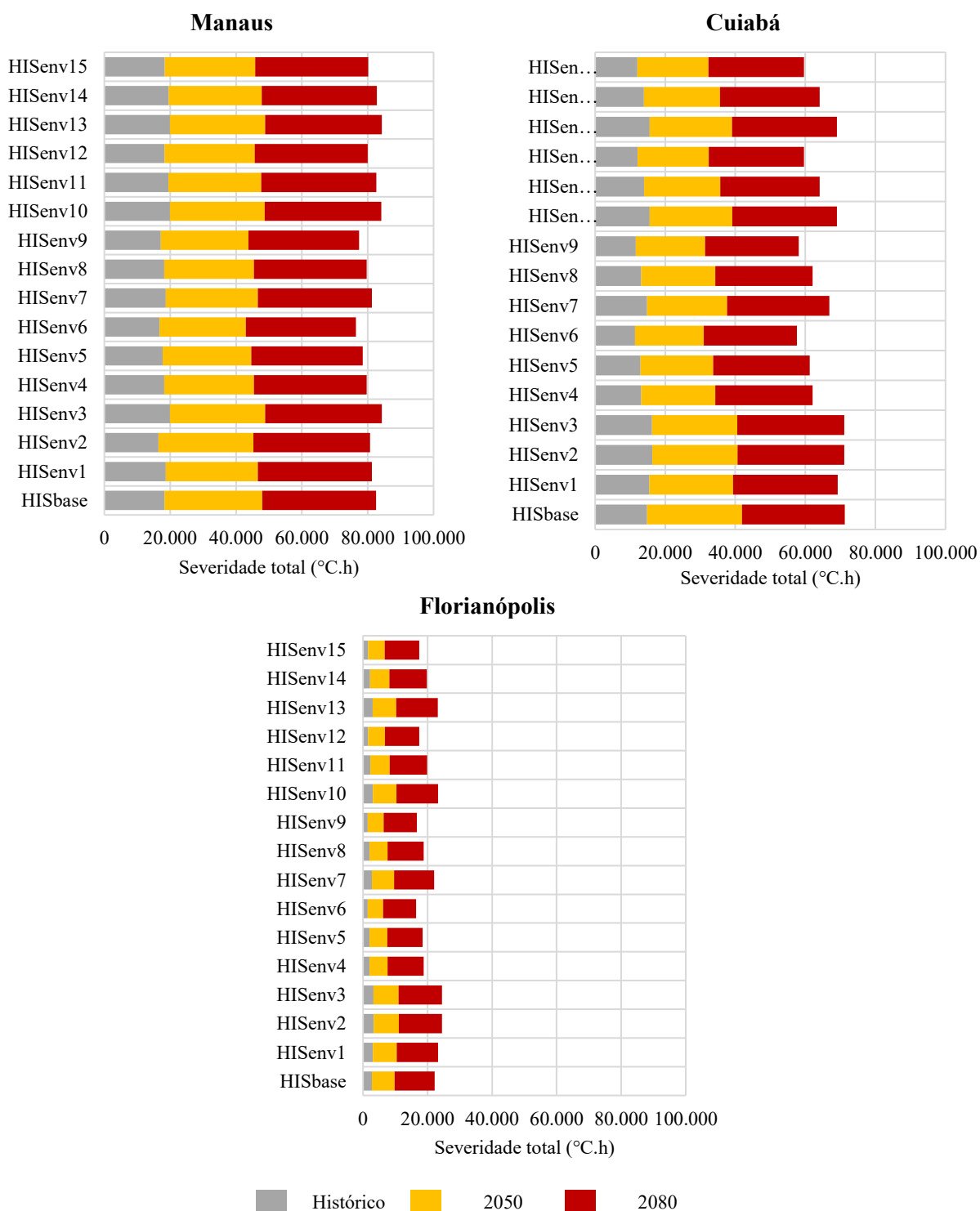
Fonte: NBR15.575 (ABNT, 2021)

As características das aberturas e dos elementos transparentes da edificação do modelo de referência foram redimensionadas de acordo com a NBR15.575 (ABNT, 2021). A abertura de ventilação adotada foi de 45% para cada abertura, com um fator solar de 0,87. A transmitância térmica do vidro foi estabelecida em 5,70 W/m².K, e o Pv, APP de 7,65%.

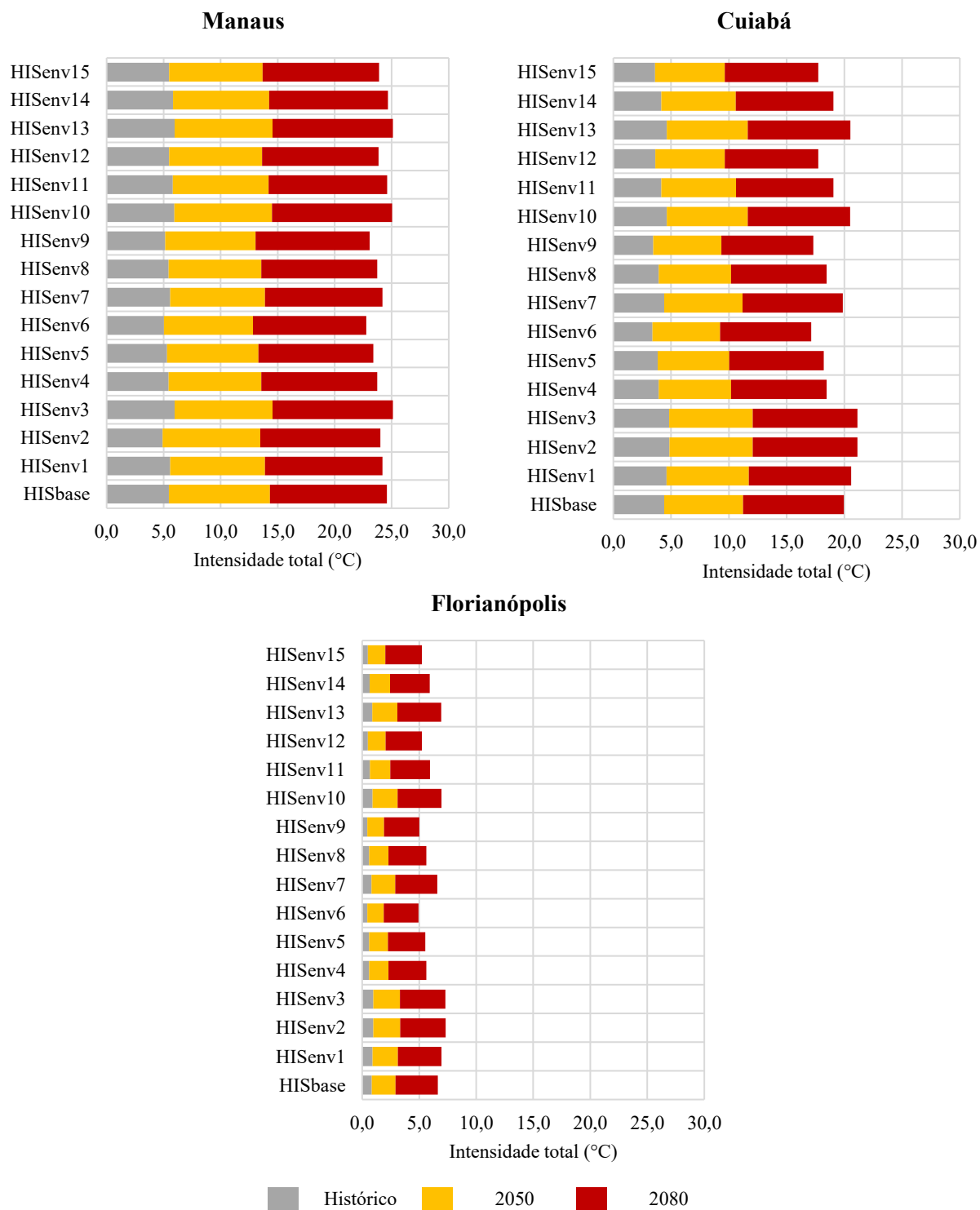
De posse da HISbase ajustada de acordo com o modelo de referência e da HISbase em sua condição real (descrita no item 3.3.1), foram realizadas simulações com o uso da ventilação natural, sendo os *Outputs* as temperaturas operativas (To em °C), para cada UH e pavimento (térreo, intermediários e cobertura).

Com o objetivo de consolidar e facilitar a análise do nível de desempenho térmico das edificações, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) disponibiliza gratuitamente uma planilha intitulada de “Planilha de cálculo dos indicadores” (LABEEE, 2023). Essa planilha permite inserir informações sobre a edificação, seja unifamiliar ou multifamiliar, para as oito zonas bioclimáticas. A planilha realiza os cálculos dos indicadores como PHFTAPP e o PHFTUH, CgTTUH (convertendo de J para kWh), a redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência (RedCgTT em %) e as TomáxUH e TomínUH. Por fim, a planilha apresenta o nível de desempenho da UH e da edificação considerando todos os APP. A demonstração desses cálculos está detalhada na parte 1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

APÊNDICE B – Severidade total do evento de calor das quinze tipologias construtivas (HISenv1 a HISenv15) das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis no período histórico e futuros (2050 e 2080)

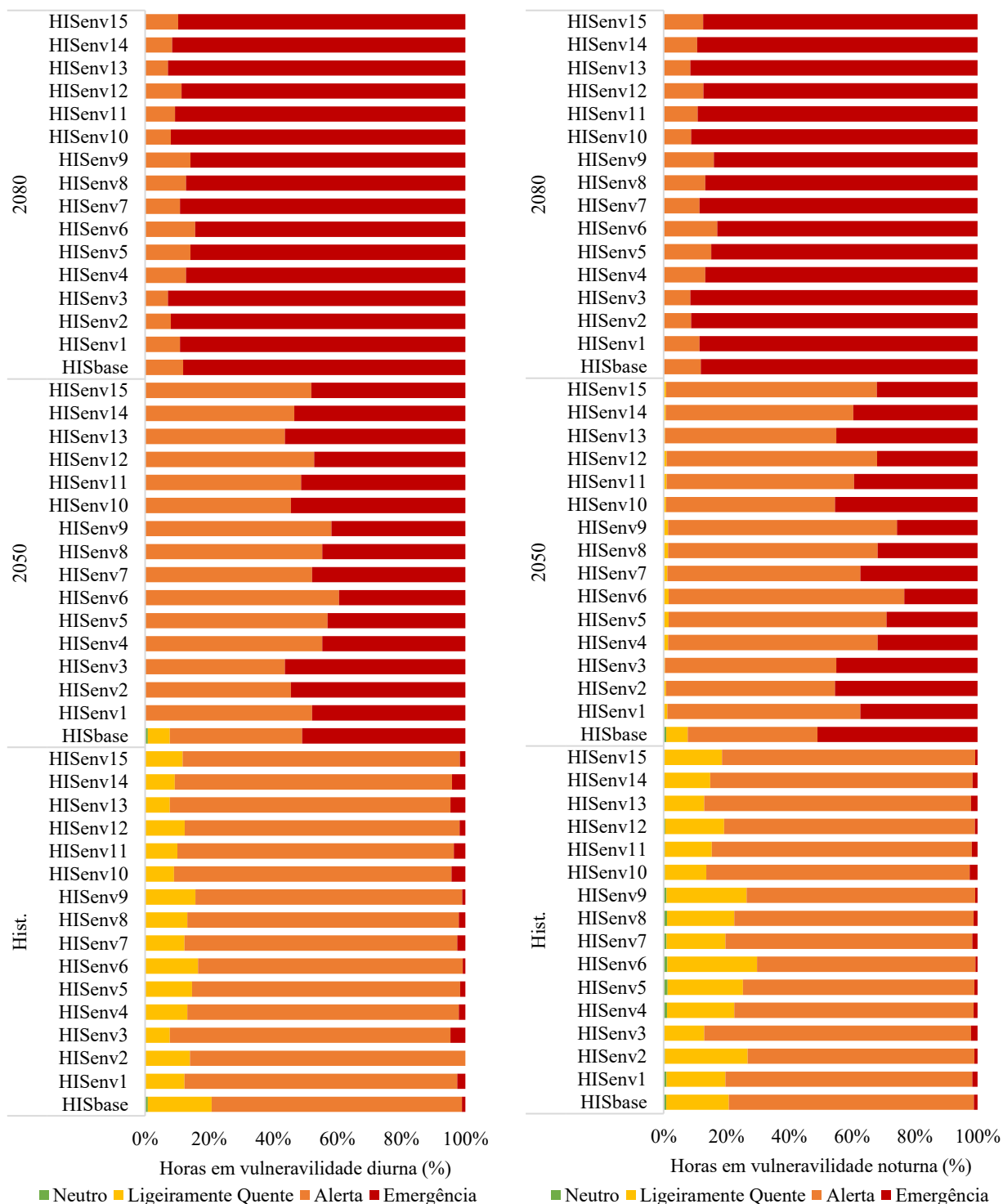


APÊNDICE C – Intensidade total do evento de calor das quinze tipologias construtivas (HISenv1 a HISenv15) das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis no período histórico e futuros (2050 e 2080)

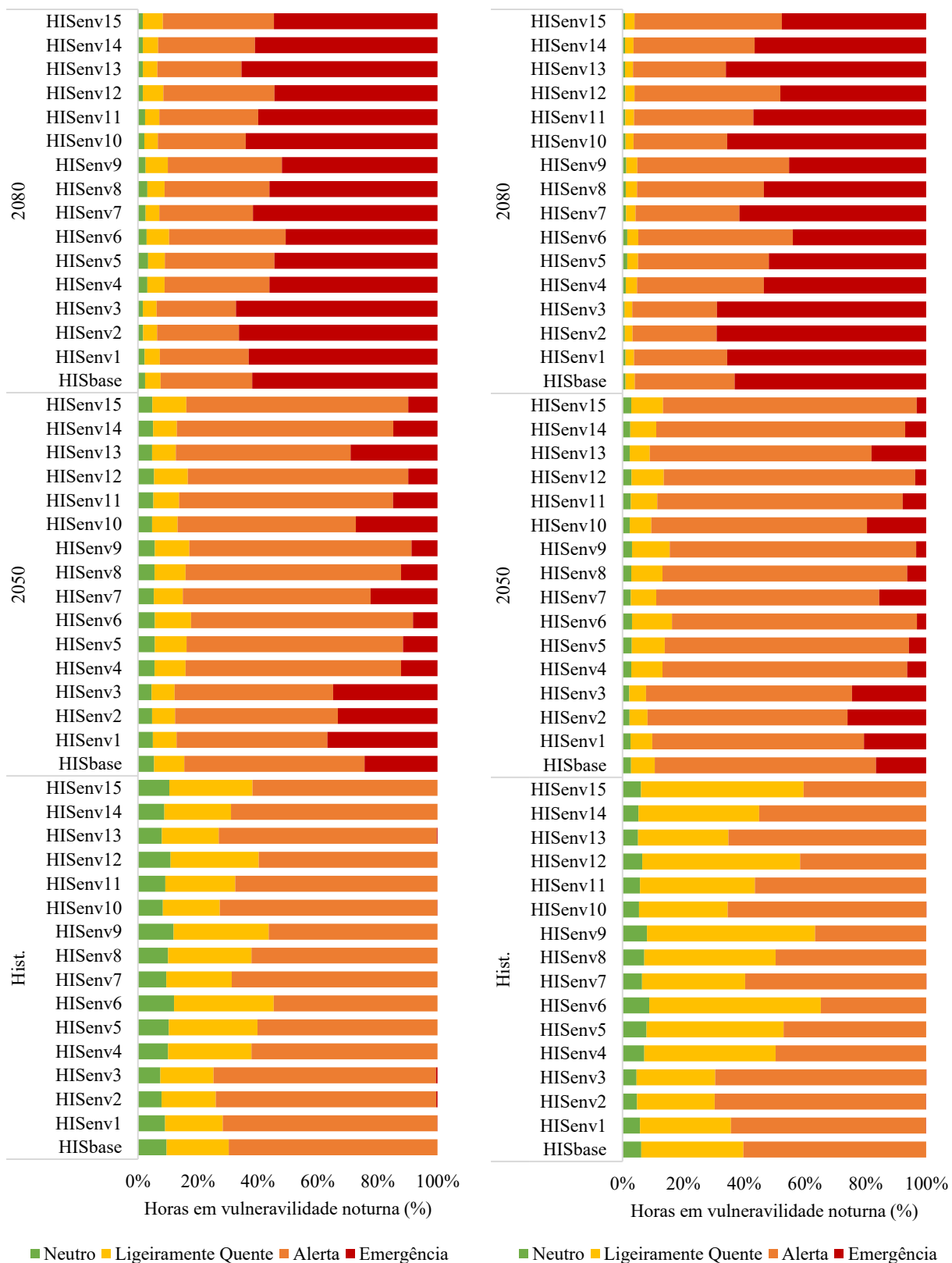


APÊNDICE D – Percentual de horas em vulnerabilidade dos ocupantes durante a exposição diurna e noturna no interior dos ambientes de permanência prolongada das quinze tipologias construtivas (HISenv1 a HISenv15) das cidades de Manaus, Cuiabá e Florianópolis no período histórico e futuros (2050 e 2080)

Manaus



Cuiabá



Florianópolis

